

電解インプロセスドレッシングを援用した超仕上加工

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/30618

電解インプロセスドレッシング を援用した超仕上加工

坂 本 智

平成9年1月

電解インプロセスドレッシング
を援用した超仕上加工

坂本 智

平成9年1月

目次

はじめに	v
使用記号	vii
第1章 序論	
1. 1 超仕上加工に関する現状と問題点	1
1. 2 本論文に関連する従来の研究	3
1. 2. 1 超仕上加工に関する研究	3
1. 2. 2 電解インプロセスドレッシングに関する研究	5
1. 2. 3 ファジィ制御に関する研究	6
1. 3 本研究の目的と研究方法	7
参考文献	10
第2章 電解インプロセスドレッシング、ファジィ制御 および加工特性の評価方法についての理論的検討	
2. 1 緒言	16
2. 2 電解インプロセスドレッシング	17
2. 2. 1 電解インプロセスドレッシングの原理	17
2. 2. 2 超仕上における電解インプロセスドレッシング	20
2. 2. 3 電解速度の検討	22
2. 3 ファジィ制御	24
2. 4 砥石平均切込み深さ \bar{a} の導出	27
2. 4. 1 平面超仕上における \bar{a} の導出	27
2. 4. 2 円筒超仕上における \bar{a} の導出	31
2. 5 比加工エネルギー k_s の導出	34
2. 6 砥石-加工物間の接触状態	35

2.7 結 言	39
参考文献	40

第3章 加工表面損傷の曲げ強さへの影響

3.1 緒 言	42
3.2 加工実験	43
3.2.1 実験装置および実験条件	43
3.2.2 使用砥石および加工材料	44
3.2.3 加工形態の確認	46
3.3 曲げ強さ実験	50
3.3.1 実験装置および実験条件	50
3.3.2 加工方向の影響	51
3.3.3 砥石粒度の影響	52
3.3.4 研削加工面の改善	54
3.3.5 破壊力学的考察	55
3.4 結 言	57
参考文献	57

第4章 電解インプロセスドレッシングの適用

4.1 緒 言	59
4.2 加工実験	59
4.2.1 実験装置および実験条件	59
4.2.2 加工液	62
4.2.3 使用砥石および加工材料	64
4.3 電解ドレッシング速度の検討	65
4.4 実験結果	68
4.4.1 電解条件の影響	68
4.4.2 加工液の決定	69

4.4.3 砥石圧力の影響	70
4.4.4 砥粒保持力の影響	70
4.5 油性加工液との比較	72
4.6 軟鋼加工への適用	73
4.7 結 言	76
参考文献	76

第5章 砥石の切れ味制御

5.1 緒 言	78
5.2 加工実験	79
5.2.1 実験装置	79
5.2.2 加工条件	81
5.3 リング状砥石の仕上げ面への影響	82
5.4 電解ドレッシングの砥石切れ味への影響	83
5.5 砥石切れ味の制御方法	85
5.5.1 電解時間による制御	85
5.5.2 オンタイムの比率 n_c による制御	86
5.5.2. a SUJ2への適用	87
5.5.2. b Al_2O_3 への適用	88
5.6 結 言	90
参考文献	91

第6章 切削性能のファジィ制御

6.1 緒 言	92
6.2 実験方法	93
6.2.1 実験装置	93
6.2.2 ファジィ制御プログラム	95
6.2.3 加工条件	102

6. 2. 4	加工条件の評価	103
6. 3	実験結果	105
6. 3. 1	加工時間入力型制御 (プロセスA)	105
6. 3. 2	加工目標値入力型制御 (プロセスB)	109
6. 4	結 言	112
6. 5	参考文献	112
第7章	総 括	114
謝 辞		118
付 録	A. 各種条件下における \bar{d} , k_s の導出	120
	A-1 平面超仕上における \bar{d} の導出	120
	A-2 円筒超仕上における \bar{d} の導出	124
	B. ファラデーの法則を応用した電解速度の導出	129

はじめに

本論文は著者が金沢大学大学院自然科学研究科 (システム科学専攻, 設計・生産工学専修) 在学中に行った研究の成果をまとめたものである。本論文の内容は, 超仕上加工による加工表面損傷が材料強度におよぼす影響, 水溶性加工液を用いて電解インプロセスドレッシングを併用した超仕上加工, 砥石の切れ味制御および加工特性のファジィ制御に関するものであり, 全体を7章から構成している。さらに, 付録として超仕上加工における加工特性の評価関数の導出, 電解インプロセスドレッシングによる砥石溶出速度の導出を行っている。

第1章は序論であり, 超仕上加工, 電解インプロセスドレッシング, およびファジィ制御に関する研究の歴史的背景・現状などについて述べたあと, 本研究の意義を明らかにしている。

第2章では電解インプロセスドレッシングの原理および第6章で用いるファジィ制御についてもふれている。また, 本研究で加工特性の評価関数として用いる砥石平均切り込み深さ \bar{d} , 比加工エネルギー k_s の導出を行っている。さらに, リング状砥石を用いた場合の砥石-加工物間の接触状態についても考察を加えている。

第3章では超仕上加工が加工面に与える損傷の程度について, 平面超仕上を施した材料の曲げ強度を測定することにより調べている。さらに加工面に生じるメディアンキ裂が材料強度を支配すると考えることで, 砥粒径が材料強度へおよぼす影響について破壊力学の立場からも考察を加えている。

第4章では超仕上加工で一般的に用いられている油性加工液の代わりに水溶性加工液を用いた超仕上について検討している。水溶性加工液を用いることによる切削性能の低下は電解インプロセスドレッシングを併用することにより補うことを試みている。さらに電解インプロセスドレッシングを超仕上加工に併用する上での電解強度, 加工液, 砥石圧力, 砥石の砥粒保持力について実験的に検討している。

第5章では電解インプロセスドレッシングを併用した超仕上加工において, 電解インプロセスドレッシングの電気量をコントロールすることにより砥石の切削性能を制御し, 意図的な加工状態を作り出す方法について検討している。本章では円筒

超仕上に電解インプロセスドレッシングを適用するため、新たな試みとしてリング状砥石を用いた円筒超仕上装置を製作し、実験に用いている。

第6章では第5章で行った砥石の切れ味制御を応用し、超仕上加工にファジィ制御を適用することによって、砥石押し付け力・電解ドレッシングの電気量を制御し、加工状態のコントロールを試みている。さらに、目標とする加工量および仕上面品位を得る方法について検討を行っている。

第7章は総括であり、本研究の成果をまとめたものである。

以上の各章を構成している研究内容はすべて精密工学会誌、精密工学会講演論文集に発表あるいは掲載されたものである。以下にそのリストを示す。

学会誌論文

- 1) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 水溶性加工液による超仕上
 - 電解インプロセスドレッシングの適用 -, 精密工学会誌, 62, 2 (1996) 252
- 2) 上田隆司, 大野誉洋, 坂本 智: ファインセラミックスの超仕上加工
 - 加工表面損傷の曲げ強さへの影響 -, 精密工学会誌, 62, 7 (1996) 1014
- 3) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 超仕上における砥石の切れ味制御,
 精密工学会誌, 62, 10 (1996) 1401.

講演論文

- 1) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 超仕上における砥石の切れ味制御,
 1995年度精密工学会秋季学術講演論文集, (1995) 165.
- 2) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 超仕上における切れ味のファジィ制御,
 1996年度精密工学会秋季学術講演論文集, (1996) 413.

使用記号

A	: 1回の振動で砥石が掃く面積 [mm ²]
a	: 砥石または加工物の振幅 [mm]
A_o	: 砥石のオーバーランする面積 [mm ²]
A_s	: 砥石のオーバーランを考慮した加工物が通過する砥石表面積 [mm ²]
ΣA	: 全加工面積 [mm ²]
ΣA_s	: 全加工面積 [mm ²]
B	: リング状加工物の幅 [mm]
b	: 砥石幅 [mm]
b_c	: モデル砥石の平均切れ刃幅 A/b
B_w	: 角柱状加工物幅 [mm]
C	: 電解強度と砥石押し付け力を考慮した加工条件
C_o	: 加工液濃度 [%]
C_g	: 砥粒の集中度
c_i	: 元素の含有率 (i はボンド剤中の元素数) [%]
C_m	: メディアスキ裂深さ [μ m]
D	: リング状加工物直径 [mm]
\bar{d}	: 砥石平均切り込み深さ [nm]
d_g	: 砥粒平均径 [nm]
d_i	: リング状砥石内径 [mm]
d_o	: リング状砥石外径 [mm]
$DV(0)$: F_n に相当する電圧値 [mV]
$DV(1)$: F_t に相当する電圧値 [mV]
ΔD	: 加工量 [mm ³]
ΣD	: 総加工量 [mm ³]
E	: 電圧降下 [V]
E_o	: 印加電圧 [V]
$E(k)$: 第2種楕円積分
ΔE	: 陰陽両極の分解電圧 (電極の可逆電位および各種加電圧の和) [V]
F	: ファラデー定数
f	: 球状圧子の押し付け力 [N]
F_n	: 加工抵抗法線方向分力 [N]
F_{nw}	: 普通砥石 (WA) の加工抵抗法線方向分力 [N]
f_n	: 砥粒一個に作用する押し付け力 [N]
F_p	: 破壊の確率 [%]

F_t	: 加工抵抗接線方向分力 [N]	δR	: 加工物半径減少量[mm]
F_{t_w}	: 普通砥石 (WA) の加工抵抗接線方向分力 [N]	$\delta R(\theta)$: 加工物中心の描く軌跡
ΔF_{t_w}	: 加工抵抗法線方向分力の目標値からの偏差	$\delta R_i(\theta)$: 加工物内端の描く軌跡
ΔF_t	: 加工抵抗接線方向分力の目標値からの偏差	$\delta R_o(\theta)$: 加工物外端の描く軌跡
G_d	: 単位体積砥石中の砥粒重量 [g/mm ³]	S	: 砥石作業面積 [mm ²]
H_w	: 角柱状加工物の厚さ [mm]	S_r	: 砥石作業面積に対する電極面積の比
$d(\delta H_w)/d\tau$: 加工物の厚さ減少速度[mm/s]	T	: 砥石振動の周期 [s]
δH_w	: 角柱状加工物の厚さ減少量[mm]	t	: 砥石切り込み量 [nm]
I	: 電流 [A]	T_c	: 加工液温度 [K]
K	: $= a\omega / V_w$	TI	: 加工開始からの加工経過時間 [s]
k^2	: $= K^2/(1+K^2)$	ΔT_c	: 電極間通過時の加工液温度差 [K]
K_t	: 破壊靱性	V	: 加工速度 [m/min]
K_{t_i}	: 破壊靱性 (モードI)	V_b	: 電流効率 η を考慮したボンドの除去体積 [mm ³]
k_s	: 比加工エネルギー [J/mm ³]	V_x	: 溶出する砥石中の砥粒体積 [mm ³]
L	: 砥石が 1 回の振動の間に動く距離 [mm]	v_j	: 電解速度 [μ m/s]
l	: 角柱状砥石の長さ [mm]	V_s	: 砥石回転周速度 [m/min]
l_c	: 線接触型円筒超仕上における砥石-加工物間の接触弧の長さ [mm]	V_w	: 加工物回転周速度 [m/min]
L_w	: 角柱状加工物の長さ [mm]	W	: 砥石 1 回転の間の加工物振動数[cpm]
Δl	: 砥石面後退量[mm]	w_j	: 電流Iが時間 $\Delta\tau_d$ 流れた時に溶出するボンド量[g]
m	: m 値	w_s	: リング状砥石の厚み [mm]
MED	: 電解強度の操作量	y	: 電極ギャップ [mm]
M_i	: 原子量 (i はボンド剤中の元素数)	y_o	: 設定電極ギャップ [mm]
MSP	: 砥石押し付け力の操作量	α	: 加工液の温度係数
N	: 加工物の振動数 [cpm]	β	: 気泡率 [%]
n	: 砥石の振動数 [cpm]	γ_s	: 砥粒密度[g/mm ²]
n_c	: オンタイムの比率 [%]	γ_i	: 元素の密度 (i はボンド剤中の元素数)
N_c	: 連続加工回数	ε	: $=(B-l)/2$
n_i	: ボンド剤の原子価 (i はボンド剤中の元素数)	η	: 電流効率
P_n	: 砥石圧力 [MPa]	θ	: 砥石回転角 [rad]
R	: リング状加工物半径 [mm]	κ	: 加工液の導電率 [$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$]
r	: リング状砥石半径 [mm]	κ_o	: 加工液の導電率 (初期値) [$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$]
Ra	: 中心線平均粗さ [mm]	σ	: 曲げ強さ [MPa]
R	: 加工液の電気抵抗 [Ω]	$\bar{\sigma}$: 平均の曲げ強さ [MPa]
Ry	: 最大粗さ [nm]	σ_b	: 砥石ボンド剤の曲げ強さ [MPa]
$d(\delta R)/d\tau$: 設定切り込み深さ (定切り込み加工) [mm] または加工物半径減少速度 [mm/s]	σF	: 材料の破壊強度
		τ	: 加工時間 [s]

τ_r : 電解ドレス時間 [s]
 ω : 砥石振動の角振動数 ($=2\pi n$) [rad/s]
 ζ : リング状砥石の円筒状加工物との接触弧の中心角 [rad]

第1章 序 論

1. 1 超仕上加工に関する現状と問題点

近年、電子機器等の高精度化が著しく、それらを構成する部品も加工変質層が少なく、サブミクロン・ナノオーダーの精度の仕上加工が要求されてきている。現在、このような要求に対してラッピングやポリッシングといった遊離砥粒を用いた加工が行われている。しかし、砥粒1個あたりの加工量が極めて少なく、長い加工時間を必要とする^{1-1), 1-2)}。

超仕上加工は1934年に創案されてから^{1-3) ~1-5)}、研削加工の分野の中でも比較的早くから注目された精密加工技術の一つである^{1-6) ~1-8)}。

超仕上加工は角柱状の砥石（または加工物）に短周期の微小振動を与えて回転運動する加工物を仕上げる精密加工法である。工具にあたる砥粒切れ刃は複数の併走する正弦波状の条痕を加工面に形成するため、仕上面にほとんど方向性を持たない。要するに他の加工法に比べて仕上面が強度異方性をあまり持たない優れた仕上面を得ることができる。また、加工条痕が複雑に交差するようなかたちで加工が行われるため、加工の効率が良く、短時間での加工が可能である。さらに、研削加工に比べ低速・低圧による加工のため、加工時に熱の発生がほとんどなく、研削熱などによる加工変質層や残留応力の存在、き裂や引っ掻き傷の発生などが少なく、幾何学的にも材質的にも優秀な仕上面を得ることができる精密加工法である。精密加工法としての超仕上加工の位置付けを図1-1に示す。研削加工等と同様に固定砥粒（砥石）を用いた加工法の一つである。超仕上加工はホーニングと非常に似た加工法であるが、砥石（または加工物）を振動させながら加工を行う点で異なる。超仕上加工では加工物の回転とともに砥石（または加工物）の振動を加えることで短時間での加工が可能となる。

超仕上加工では微細砥粒砥石を用いること、同一作業面が常に加工面と接していることなどのため、切りくず排出が難しく、一般に潤滑性・浸透性に優れた油性加工液を用いている。ところが、超仕上加工を研削加工等の水溶性加工液を用いる加

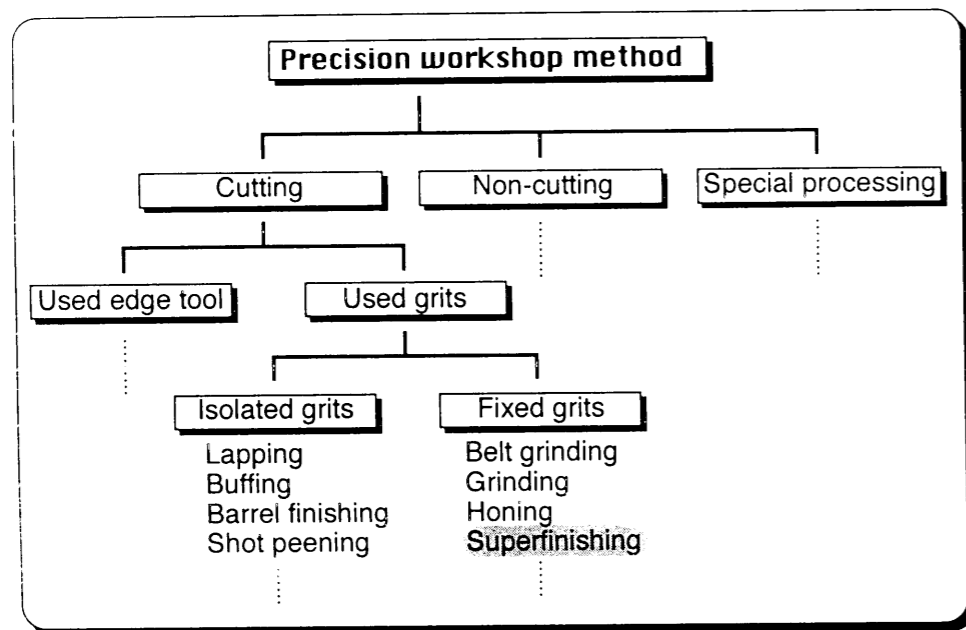


Fig. 1-1 Method of precision machining

工法と同一加工ラインに組む場合、水溶性加工液の洗浄・乾燥等の工程を必要とする。このことが超仕上加工を加工ラインに組むときの大きな障害となっている。超仕上加工に水溶性加工液を用いることができれば加工液を1種類に統一することも可能となり、廃液処理・加工液の管理等の多くの利点がある。しかし、切りくず排出性能の低下等により、即座に砥石は目づまり状態となり、著しい切削性能の低下を生じてしまう^{1.9)~1.12)}。水溶性加工液を超仕上加工に用いようとする場合、切りくず排出性能の向上、適度な砥石の自生作用等を促す手法が必要となってくる。

超仕上加工は短い加工工程の中で砥石作業面が切削状態から研磨状態へと変化することによって仕上面粗さの向上を図っている。すなわち、加工の進行に伴い、次第に砥石が目づまり等を生じ、砥石の切削性能は低下する。切削能力を失った砥石は切削工具から研磨工具へと変化し、加工面を研磨することにより仕上面粗さの向上を図っている。しかし、切削性能低下の時期が適正でない場合、加工を続けても前加工による加工痕が残ったり、砥石表面の凹凸が転写され、優れた仕上面を得ることが困難となってくる。さらに近年では砥石寿命の観点から砥粒保持力の大きなメタルボンド超砥粒砥石が超仕上加工にも用いられだしてきており^{1.13)}、砥石の切削性能をコントロールは困難を増している。一般にこの問題の解決方法として切削工

程と仕上工程とを分け、複数の砥石、加工条件によって加工を行う2段加工が行われている^{1.11), 1.2)}。しかし、2段加工を行うためには複数の砥石を用意する必要があり、加工途中での砥石交換およびドレッシングが必要となるため、効率的な方法であるとはいえない。

1.2 本論文に関連する従来の研究

1.2.1 超仕上加工に関する研究

超仕上加工は1934年にChrysler Co.のD. A. Wallanceにより創案された加工法である^{1.4)~1.6)}。当時、製品の輸送中に玉軸受やころ軸受のレース面(転走面)に鋼球やころの振動や衝撃によるブリネル圧痕を生じる事故が度々生じていた。この対策として、小さな油砥石を用いて手でジグザグに仕上げ、圧痕を取り除いたが、この作業を行うと、その後ブリネル圧痕を生じ難くなることがわかった。

その後、1939年にD. A. Wallanceより初めて超仕上加工が学界に発表された^{1.7)}。仕上面と仕上能率が他の仕上法に比べ非常に優れていたため、Superfinish(超仕上)と名付けられアメリカ国内はもちろん各国へと広まった。図1-2に一般的な円筒外周面を仕上げる円筒超仕上の模式図を示す。

日本国内においては1941年頃から研究が始められだしたが、終戦・戦後の混乱のため、航空機産業で一部利用されたに過ぎなかった。しかし、1940年代後半から実用的研究が始められた。当時は専用超仕上盤よりも汎用超仕上装置の研究に重点が

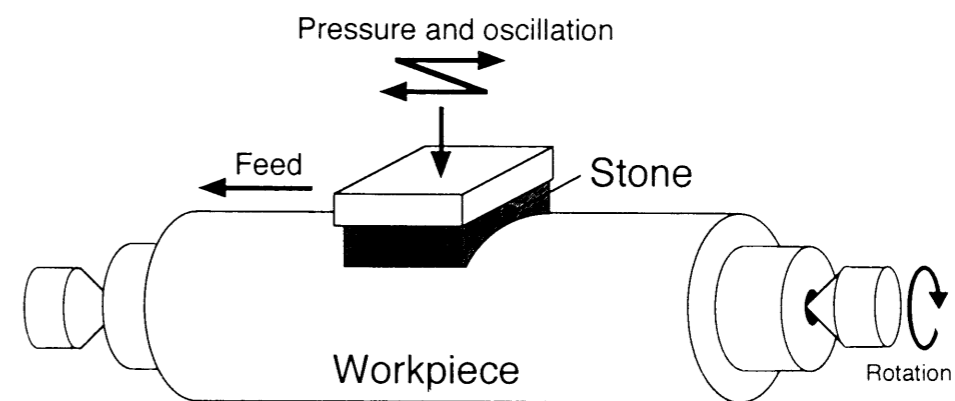


Fig. 1-2 Schematic illustration of cylindrical superfinishing

置かれた。しかし、砥石の研究の立ち遅れや機械専門メーカーが無かったことから本格的な実用化には至らなかった^{1-10, 1-51}。

1956年に新たに平面超仕上げが考案され¹⁻¹¹、精力的に超仕上げ加工の理論的解析・実験的検証が行われた。平面超仕上げの加工量に関する研究では単粒による切削量に切削状態にある砥粒数を乗じたものが加工量になると考え、理論的・実験的に解析が行われた^{1-11, 1-15}。加工抵抗に関しても砥粒の押し込み、引っ掻きによるものとしての研究が行われた¹⁻¹⁶。単粒の押し込みを基本とした仕上面粗さの理論式も提案された¹⁻¹⁷。仕上面の残留応力¹⁻¹⁸ および加工温度¹⁻¹⁹、さらには加工変質層の深さに関する研究¹⁻²⁰ も行われ、加工機構・加工条件についての基礎的研究が成し遂げられた。超仕上げ加工の鏡面生成機構についても自動的潤滑説、臨界圧力説、砥石目づまり説、表面流動説等が提案された¹⁻¹¹。臨界圧力説でいう臨界圧力とは今日用いられる意味とは異なり、砥粒切れ刃に作用する力についてであり、砥粒強度とその保持力を越えて破壊・脱落する最低圧力を指す。現在では自動的潤滑説、臨界圧力説、砥石目づまり説を統合したものが超仕上げ加工の鏡面生成機構と考えられている。

その後、超仕上げに関する研究はあまり大きな進展を見せなかったが、1970年代中頃から再び超仕上げに関する研究が行われだした。砥石の性能も飛躍的に向上し、当時の#1000以下の粗粒砥石から#3000以上の砥石が用いられだし、加工性能向上に関する研究が行われだした¹⁻²¹。

1990年代にはいるとダイヤモンドやCBN（Cubic Boron Nitride）といった超砥粒砥石、ボンド剤に金属を用いたメタルボンド砥石を用いての超仕上げ加工に関する研究が盛んに行われだした^{1-22) ~1-25)}。

近年では工具にあたる砥粒切れ刃には注目せず、巨視的に砥石を一つの工具とみなし、超仕上げ加工の砥石平均切り込み深さ、被加工エネルギーが導出され、超仕上げ加工の切削機構が解明されている^{1-22), 1-23)}。また、加工物として、金属材料に比較して硬度・強度・耐熱性・耐摩耗性・耐蝕性において優れており、構造用材料、機能性材料として多方面への実用化が望まれているファインセラミックスが用いられるようになってきている。フェライト、アルミナ、炭化珪素、窒化珪素、ジルコニアといった加工材料に対し、その被削性が明らかにされてきている^{1-23), 1-24)}。

1. 2. 2 電解インプロセスドレッシングに関する研究

図1-3に主な砥石ボンド剤の分類を示す。近年では砥石寿命の観点からも強固な砥粒保持力を持つメタルボンド砥石が用いられだしてきている。しかし、メタルボンド砥石は強固な砥粒保持力故、難ドレッシング性/難ツルーイング性を持っている。電解インプロセスドレッシングはこのような金属系ボンド剤を対象としたドレッシング方法である^{1-26)~1-30)}。電解インプロセスドレッシングは砥石エアカット部に陰電極を対偶させ、砥石（陽極）-陰電極間の電解作用によりボンド剤のみを溶出させることによりドレッシング効果を得るものである。

電氣的ドレッシング/ツルーイング法は1950~60年代に提案されたドレッシング法である。しかし、当時は実用化は進まず、研究の進展は見られなかった。電氣的ドレッシング/ツルーイング法は1980年代後半に入り、ELID（Electrolytic In-process Dressing）が提案され¹⁻³¹⁾、インプロセスドレッシングとして主に研削加工の分野で行われだすことにより大きく広まった。1990年以降からは様々な電氣的ドレッシング/ツルーイング法が検討されてきた。大別すると放電現象を利用したドレッシング法^{1-32) ~1-38)}、ツルーイング法^{1-39) ~1-44)}と電解作用を利用したドレッシング法^{1-15) ~1-51)}、ツルーイング法^{1-55), 1-56)}である。さらに、放電現象、電解作用両者を利用したドレッシング/ツルーイング法^{1-57) ~1-63)}も提案されている。1990年以降は電氣的ドレッシング/ツルーイング法以外にも磁力・遠心力を利用したドレッシング/ツルーイング法^{1-64), 1-65)}、ケミカルドレッシングとして、Cu-Sn系メタルボンド砥石を硫酸過酸化水素に浸すことによってドレッシング効果を得る方法¹⁻⁶⁶⁾等の様々なドレッシング/ツルーイング法が提案されており、メタルボンド砥石の実用化に

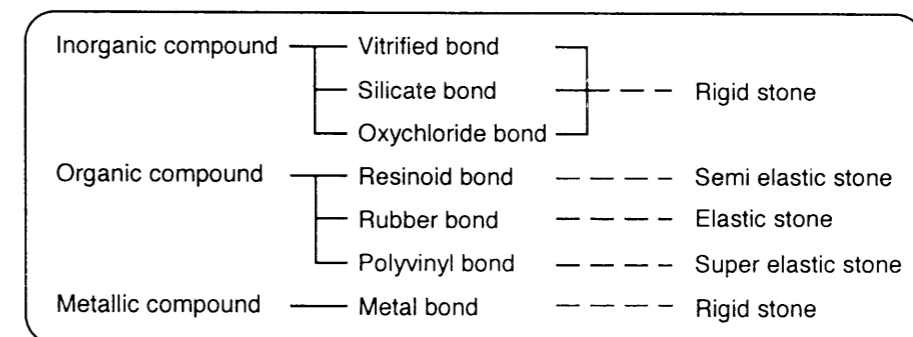


Fig. 1-3 Classification of bond material

大きく貢献している。また、これらの手法を用いた新しい工作機械の開発研究も盛んに行われている^{1-67) ~1-75)}。

電解インプロセスドレッシングは比較的簡単な装置で実現可能で、特別な加工液を必要としないことから精力的に研究が進められた。電解インプロセスドレッシングを行うための砥石についての研究も鋳鉄砥石・鋳鉄ファイバ砥石^{1-76) ~1-78)}、鋳鉄ボンド酸化セリウム砥石¹⁻⁷⁹⁾、青銅ボンド砥石^{1-80), 1-81)}、コバルトボンド砥石¹⁻⁸²⁾、メタルレジンボンド砥石¹⁻⁸³⁾と多種多様な金属系ボンド砥石に対しての研究が行われている。電解電源に関する研究についても交流電源¹⁻⁸⁴⁾、直流電源^{1-85), 1-86)}、直流パルス電源^{1-87) ~1-89)}を用いた手法が報告されている。加工液に関しても多くの研究が行われており、導電性物質としてアミン系の化合物を含有する加工液が主流である^{1-90) ~1-93)}。

1. 2. 3 ファジィ制御に関する研究

ファジィアルゴリズムは1968年にL. A. Zadehにより発表され¹⁻⁹⁴⁾、車を駐車させる場合を例に挙げてファジィアルゴリズム説明している。車を駐車させる場合を運動方程式で表すことは非常に困難であるが、定性的な言語を用いて説明することは非常に容易であることを示している。さらにファジィアルゴリズムの考えを押し進めて『不適合性の原理』について発表している¹⁻⁹⁵⁾。『不適合性の原理』とは「システムの複雑さが増し、ある限度を超えるとシステムの挙動について精密かつ正確で意義のある記述をすることは困難となる。」ということである。要するに、複雑なシステムに対して見通しの良い定性的なルールを用いることが現実的であり、実用性があるということである。さらに曖昧な対象の計量法としてファジィ積分が提案された¹⁻⁹⁶⁾。

1976年にこれらの提案からファジィ制御を最初に試みたのはE. Mamdaniである¹⁻⁹⁷⁾。制御対象としてスチームエンジンの模型を用い、従来のPID制御との比較を行い良好な結果を得ている。

1980年以降、制御対象をセメントキルンとし、ファジィ制御は実用化に移された¹⁻⁹⁸⁾。ファジィ制御は1985年頃から本格的実用化の時代へと移っていく。ファ

ジィ制御の発展形であるともいえる制御ルールの自動生成を行うSOC (Self-Organizing Controller) に関する報告もある¹⁻⁹⁸⁾。SOCは現在アドバンスド・ファジィ制御として注目を集めている手法である。

ファジィ制御の機械加工分野での適用は主に旋削加工や研削加工で行われている。旋削加工では工具破損の予見¹⁻¹⁰⁰⁾、切りくず長さ・びびり振動・工具欠損等の加工状態監視システム^{1-101), 1-102)}からエキスパートシステムの構築¹⁻¹⁰³⁾に至るまで応用されている。工具破損等の予測は技術者の勘と経験による判断によるところが大きく、ファジィ制御の手法を用いることで技術者のノウハウを容易にフィードバックさせることが可能である。研削加工では知能的自動化に関する研究等が報告されている^{1-104) ~1-106)}。また、工具にあたる砥粒切れ刃の挙動が複雑で、数式表現が極めて困難なため、従来の制御手法では不可能だったが、ファジィ制御の導入によって制御も可能となりつつある。さらに近年ではファジィ制御を支援するかたちでニューラルネットワークの手法も用いられだしてきている^{1-102), 1-107), 1-108)}。

1. 3 本研究の目的と研究方法

表面粗さが優れ、加工変質層が少ない超精密加工面を得ようとするとき、ポリッシングやラッピング加工を施すのが一般的である。しかし、ポリッシングやラッピング加工では遊離砥粒を用いることから加工効率が悪く、数時間という長い加工時間を必要とする。それに対し、砥石を用いる超仕上加工では極めて生産性が良く、数秒から数分といった短時間での加工が可能である。しかし、砥粒径の小さな砥石を用いる超仕上加工であっても、切りくずを生成する加工法である以上、加工表面に何らかの損傷を与えると考えられる。

そこで超仕上加工が加工面に与える損傷の程度について、ファインセラミックスを加工物として用い、その曲げ強度を測定することにより調べる。セラミックスは焼結面のまま用いることが一つの理想と考えられることから、焼結面と同等程度の材料強度が得られることを一つの目安と考えることにする。まず、粒度を#500から#8000まで変化させた砥石を用いて加工を行い、切りくずを生成する正常な加工

状態にあることを確かめ、加工を施した材料の曲げ強さを測定する。次に焼結面や研削面を持つ材料と比較することにより超仕上が加工面におよぼす損傷の程度について検討を行う。さらに砥粒径が材料強度へおよぼす影響について破壊力学の立場からも考察を加える。

加工表面に与えるダメージを抑えるためには砥粒径の小さな砥石を用いること、砥石圧力を下げることが有効である。しかし、砥粒径の小さな砥石を用いると、砥石が目づまりを生じやすくなり、砥石の切れ味は格段に低下してしまう。そこで、目づまりによる砥石切れ味の低下を電解インプロセスドレッシングを行うことにより補うことを検討する。従来、超仕上加工では油性加工液が用いられているが、本論文では電解インプロセスドレッシングを行うために導電性の水溶性加工液を用いることを試みる。まず、安定した電解インプロセスドレッシングを実現するために理論的に電解速度、砥石－電極間隙の時間変化の考察を行う。また、電解強度、加工液、砥石圧力、砥石の砥粒保持力について実験的に検討する。超仕上加工に水溶性加工液を用いることが可能となれば、次のような利点もある。研削加工など他の加工法では水溶性加工液を用いる場合が多いため、油性加工液を用いる超仕上を仕上加工として加工ラインに組む場合、水溶性加工液の洗浄・乾燥後に超仕上加工を行わなければならない、加工後再び油性加工液の洗浄・脱脂が必要な場合も生じる。油性加工液の廃液処理も難しい。従って超仕上加工に水溶性加工液を用いれば洗浄などの工程を省くことができ効率的である。また、加工液を1種類に統一することも可能となり、その管理を極めて単純化できる。

超仕上加工では砥石が切削状態から磨き状態へと変化することにより短時間に優れた加工面を得ることができる。ところが、砥石寿命が短いことから、生産性に重点を置く場合、ダイヤモンドやCBNといった超砥粒砥石が用いられるようになってきている。超砥粒砥石を用いた場合、ボンドによる砥粒保持力が大きいこと、砥粒が磨耗しにくいことなどから、普通砥石のように短時間で切削状態から磨き状態へと変化させることはできない。このため砥石は加工材料に合わせて砥粒保持力を選ぶのが一般的であり、材料が多種類におよぶとき、砥粒保持力の異なる砥石を多数用意する必要がある。ところが砥石の自生作用をコントロールすることにより、任

意の切れ味を持たせることができれば、わずかな種類の砥石で広い範囲の加工材料をカバーできる可能性もある。さらに一つの砥石で粗加工から仕上加工までを行うことが期待できる。そこで電解インプロセスドレッシングの電気量をコントロールすることによって砥石の切れ味を制御しながら加工を行う方法について実験的に検討を行う。本論文では円筒外周面を仕上げる円筒超仕上に電解インプロセスドレッシングを適用するため、新たな試みとしてリング状砥石を用いた超仕上装置を製作し、実験に用いる。この装置を用いて、電解インプロセスドレッシングの電解条件をコントロールすることにより、種々の加工状態を意図的に作り出すことを試みる。砥石の切削能力をコントロールすることができれば、粗加工から仕上加工までを同一砥石で行うことが可能となる。さらに、この方法で砥石の切れ味をコントロールすれば、被削性の異なる種々の加工物を同一砥石で加工できる可能性も十分ある。一方、金型のような加工表面の大きな材料を長時間かけて仕上げるとき、加工状態を一定に保つことは難しく、加工を中断してドレッシングを行う必要がでてくる。しかし、砥石の切れ味を一定にコントロールできれば、連続的に長時間の加工が可能となる。

最後にファジィ制御の手法を用い、意図的に加工状態を制御する方法について検討を行う。超仕上加工は定圧加工であるため、切削能力の低下は切削抵抗（接線方向分力）の低下として現れる。そこで加工抵抗を加工状態の監視信号として、砥石作業面の状態を意図的にコントロールし、目的とする加工状態を作り出すことを試みる。さらに、加工目標値を定め、目標通りの加工を行うことも試みる。

参考文献

- i - 1) 田中芳信, 津和秀夫, 井川直哉: 精密工作法 (下), 共立出版, (1982) 60, 75.
- i - 2) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰: 研削加工と砥粒加工, 共立出版, (1984) 182, 183.
- i - 3) A. M. Swigert: The story of Superfinish, Lynn Pub, (1940) 31.
- i - 4) 松井正巳, 中里昭三: 超仕上作業とその原理, 養賢堂, (1965) 1.
- i - 5) 堀越真一, 橋本忠正: 研磨作業, 日刊工業新聞社, (1955) 337.
- i - 6) 難波義治: 研削加工技術および研削加工機の新潮流, 精密工学会誌, 62, 1 (1996) 30.
- i - 7) 小坂誠市郎: 超仕上説明の一提案, 精密機械, 9, 7 (1942) 1.
- i - 8) 田中義信, 田中行雄: 超仕上に関する研究 (第1報) - 作業条件について -, 精密機械, 19, 2 (1953) 59.
- i - 9) 佐々木外喜雄, 北 秀夫: 超仕上工作液としての水の実用性について, 日本機械学会誌, 50, 349 (1947) 274.
- i - 10) 佐々木外喜雄, 北 秀夫: 代用超仕上工作液の研究, 精密機械, 15, 8,9 (1949) 167.
- i - 11) 広井 進, 山中康夫: 切削油剤と研削油剤, 幸書房, (1982) 87.
- i - 12) 中島利勝, 塚本真也, 吉川満雄: 水溶性研削油剤の作用に関する研究 (第3報) - 界面活性剤の冷却性および潤滑性と研削結果 -, 精密工学会誌, 54, 2 (1988) 414.
- i - 13) 松森 昇: 超砥粒による精密砥粒加工技術, 機械の研究, 42, 4 (1990) 482.
- i - 14) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第1報) - 平面超仕上の切削量について (その1) -, 精密機械, 22, 7 (1956) 309.
- i - 15) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第2報) - 平面超仕上の切削量について (その2) -, 精密機械, 22, 9 (1956) 387.
- i - 16) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第3報) - 平面超仕上抵抗について (その1) -, 精密機械, 22, 11 (1956) 477.
- i - 17) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第4報) - 平面超仕上面の粗さについて (その1) -, 精密機械, 23, 1 (1957) 27.
- i - 18) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第5報) - 平面超仕上面の残留応力について -, 精密機械, 23, 11 (1957) 539.
- i - 19) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第6報) - 超仕上温度について (その1) -, 精密機械, 24, 9 (1958) 460.
- i - 20) 松井正巳: 平面の超仕上に関する研究 (第7報) - 超仕上面の加工変質層深さについて -, 精密機械, 24, 10 (1958) 539.
- i - 21) 松森 昇, 山本 明: 超仕上性能の特性値としての臨界圧力について - 超仕上砥石の仕上性能向上に関する研究 (第1報) -, 精密機械, 40, 10 (1974) 852.
- i - 22) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰: 超仕上の加工機構に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 57, 538 (1991) 2154.
- i - 23) 上田隆司, 金曾久佳, 松森 昇, 杉田忠彰: ファインセラミックスの超仕上加工 - 加工条件と被削性 -, 精密工学会誌, 57, 7 (1991) 1229.
- i - 24) 中島利勝, 大橋一仁, 竹本知臣: 常圧焼結窒化けい素の超仕上機構に関する研究, 精密工学会誌, 59, 9 (1993) 1483.
- i - 25) 恩地好晶, 松森 昇, 井川直哉, 嶋田尚一: 微粒CBN砥石による超仕上加工機構, 精密工学会誌, 62, 5 (1996) 666.
- i - 26) H. Ohmori and T. Nakagawa: Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing, Ann. CIRP, Vol.39, No. 1 (1990) 329.
- i - 27) 大森 整, 外山公平, 中川威雄: 鏡面研削されたシリコンウェハ加工変質層の評価, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 989.
- i - 28) 久保田護: メタルボンド超砥粒砥石の電氣的ドレッシング, 砥粒加工学会, Vol.35 No.4, (1991) 15.
- i - 29) H. Ohmori: Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26, No. 4 (1992) 273.
- i - 30) H. Ohmori and I. Takahashi: Efficient Grinding Technique Utilizing Electrolytic In-process Dressing for Precision Machining of Hard Materials, Advancement of Intelligent Production, (1994) 315
- i - 31) 大森 整, 中川威雄: 鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石によるシリコンの研削加工 (第3報), 1987年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1987) 687.
- i - 32) 植松哲太郎, 鈴木 清, 柳瀬辰仁, 上永修士, 中川威雄: 機上放電ドレッシングされたカップ砥石の研削性能, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 709.
- i - 33) 鈴木憲二, 高橋邦夫: 接触放電ドレッシング法の実用化研究 (第2報) - 新電極構成の効果について -, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 427.
- i - 34) K. Suzuki, T. Uematsu, T. Yanase, M. Honma, S. Asano and T. Matsuo: Development of a Simplified Electrochemical Dressing Method with Twin Electrodes, Ann. CIRP, Vol.40, No. 1 (1991) 363.
- i - 35) 朴 圭烈, 権 哲淳, 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 高速研削対応ドレッシング方式の提案, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 913.
- i - 36) J. Tamaki and T. Kitagawa: Electrocontact Discharge Dressing of Metal-Bonded Diamond Wheel (Part 1) - Truing Efficiency and Grinding Performance -, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26, No. 4 (1992) 284.
- i - 37) J. Tamaki and T. Kitagawa: Electrocontact Discharge Dressing of Metal-Bonded Diamond Wheel (Part 2) - Mechanism of Truing and Dressing -, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.28, No. 4 (1994) 334.
- i - 38) 木村昌博, 柳瀬辰仁, 河邊有紀, 鈴木 清, 竹内恵三, 植松哲太郎: ブラシ電極法による超砥粒ラップ砥石の放電ドレッシング, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 183.
- i - 39) K. Suzuki, T. Uematsu and T. Nakagawa: On-Machine Trueing/Dressing of Metal Bond Grinding Wheels by Electro-Discharge Machining, Ann. CIRP, Vol.36, No. 1 (1987) 115.
- i - 40) K. Suzuki, T. Uematsu, S. Asano, T. Yanase and T. Nakagawa: Advances in Grinding Ceramics & WC, Industrial Diamond Review, Vol.48, No. 529 (1988) 278.
- i - 41) 田牧純一, 北川武揚: 回転電極方式によるメタルボンドダイヤモンド砥石の接触放電ドレッシング (第1報) ツルーイング特性について, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 429.
- i - 42) 田牧純一, 北川武揚: 回転電極方式によるメタルボンドダイヤモンド砥石の接触放電ドレッシング (第2報) ツルーイング能率について, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 909.
- i - 43) 植松哲太郎, 柳瀬辰仁, 鈴木克直, 鈴木 清: プロファイル研削用砥石の機上放電ツルーイング - 第2報: 放電ツルーイングされた成形砥石の研削特性 -, 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 141.

- 1-44) 田中純一, 嶋田篤志, 北川武揚, 井山俊郎, 水野雅裕: 複合電極を用いたメタルボンド砥石の接触放電ツルージング, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 185.
- 1-45) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 電解ドレッシングを利用した両面ラップ研削, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 251
- 1-46) 大森 整, 中川威雄: 半導体接触電極による電解ドレッシング鏡面研削 (第1報: シリコン電極による ELID), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 925.
- 1-47) 小松利安, 大柴勝彦, 藤原和徳, 上野正雄, 大森 整: 複合セラミックスの ELID 研削, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 585.
- 1-48) 大森 整, 成田俊宏: 固定砥粒複合ラッピングによる鏡面仕上げ, 超精密加工マニュアル, 大河出版 (1989) 120.
- 1-49) 大森 整, 島田 満, 中川威雄: 電解インプロセスドレッシング機構に関する一考察, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 731.
- 1-50) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 電解ドレッシング鏡面研削の高効率化に関する考察 (第1報: ELID 鏡面研削の総括と高効率化手法の提案), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 923.
- 1-51) 大森 整: 各種硬脆材料の鏡面研削, 機械と工具, 6 (1991) 61.
- 1-52) 大森 整: 硬脆材料の ELID 研削—その原理と実用化—, ニューセラミックス, 8 (1992) 45.
- 1-53) 大森 整: 超精密加工に対応した電解インプロセスドレッシング (ELID) 研削法, 精密工学会誌, 59, 9 (1993) 1451.
- 1-54) 大森 整: 電解インプロセスドレッシング (ELID) による難加工材の高効率鏡面研削, マシン&ツールジャーナル, 34, 5 (1995) 10.
- 1-55) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 電解ドレッシング研削によるツルージング/ドレッシング法の提案, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 349.
- 1-56) 高橋一郎, 大森 整, 中川威雄: 電解ドレッシングを利用した形状ツルージングの試み, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 1011.
- 1-57) 鈴木 清, 植松哲太郎, 柳瀬辰仁, 浅野修司, 飴井充弘: ツイン電極法による電解/放電ドレッシングの研究 (第1報: インプロセス電解ドレッシングの試み), 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 711.
- 1-58) 植松哲太郎, 鈴木 清, 柳瀬辰仁, 田中敏晴, 浜潟隆徳: ツイン電極法による電解/放電ドレッシングの研究 (第2報: 電解ドレッシングの諸条件), 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989) 331.
- 1-59) 植松哲太郎, 鈴木 清, 宮寄英児, 田中敏晴, 稲見博之, 渡辺善仁: ツイン電極法による電解/放電ドレッシングの研究 (第4報: 電解ドレッシングの諸条件—その2), 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 985.
- 1-60) 植松哲太郎, 鈴木 清, 北嶋弘一, 本間光明, 宮寄英児, 浜潟隆徳: ツイン電極法による電解/放電ドレッシングの研究 (第5報: カップ砥石のインプロセス電解ドレッシング), 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 987.
- 1-61) 植松哲太郎, 白川勇次, 本間光明, 稲見博之, 宮寄英児, 鈴木 清: ツイン電極法による電解/放電ドレッシングの研究 (第6報: 各種砥石に対する最適プロセスドレッシング条件), 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 431.
- 1-62) 植松哲太郎, 本間光明, 白川勇次, 宮寄英児, 高松 洋, 木佐木孝博, 鈴木 清: ツイン電極法による電解/放電ドレッシングの研究 (第7報: 超硬合金の溝入れ研削), 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 433.
- 1-63) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 放電と電解を複合させたインプロセスドレッシング研削, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 203.
- 1-64) 鈴木 清, 竹内恵三, 植松哲太郎, 蒔崎 剛, 宮森史朗, 関 洋子, 河邊有紀: 磁気研磨法による超砥粒砥石のドレッシング (第1報) —磁気研磨援用ドレッシング法の提案—, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 179.
- 1-65) 鈴木 清, 竹内恵三, 関 洋子, 河邊有紀, 木村昌博, 植松哲太郎: 遠心力利用法の超砥粒ラップ砥石への適用, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 181.
- 1-66) 鈴木節男, 赤司澄夫, 小泉達也, 吉田雄二, 黛 政雄: メタルボンドホイールへのケミカルドレッシング法の試み, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 907.
- 1-67) 大森 整, 高尾佳宏, 中川威雄: 電解ドレッシング鏡面研削超精密加工機, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 615.
- 1-68) 高橋一郎, 大森 整, 中川威雄: 電解ドレッシング研削を利用したV溝鏡面加工の試み, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 257.
- 1-69) 大森 整, 勝又志芳, 高橋一郎, 中川威雄: 円筒研削盤による電解ドレッシング鏡面研削, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 255.
- 1-70) 高田芳治, 大森 整, 中川威雄: ターニングセンタによる非球面ミラー加工の試み, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 259.
- 1-71) 大森 整, 朴 圭烈, 高橋一郎, 中川威雄: 電解インタバルドレッシング研削による小径円筒内面の鏡面加工, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 253.
- 1-72) 李 偉, 大森 整, 石井利夫, 山田裕久: ELID 搭載センタレス研削盤の開発と適応効果 (第1報: 基本構成とセラミックスの高効率加工), 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 589.
- 1-73) 神田虎彦, 三橋眞成, 伊関雄二: 光デバイス端面研削切断, 精密工学会誌, 60, 2 (1994) 245.
- 1-74) 大森 整, 木村貴紀, 山元 隆: ELID 機能付ホーニング盤の開発および適用効果 (第2報: メタルボンド砥石の影響), 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 581.
- 1-75) 守安 精, 大森 整, 中川威雄: 超精密 ELID 研削における非球面形状の制御 (第2報: 形状精度と面粗さの両立), 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 603.
- 1-76) 大森 整, 中川威雄: 鏡面研削における微細砥粒砥石表面性状の変化, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989) 589.
- 1-77) 大森 整, 伊澤守康, 中川威雄: 鉄系ボンド砥石による電解ドレッシング鏡面研削効果 (第1報: ELID 鏡面研削用メタルボンド砥石の提唱), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 921.
- 1-78) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 電解インプロセスドレッシング機構に関する一考察 (第2報: 微粒ストレート砥石の表面観察), 1991年度精密工学会春季大会講演会講演論文集, (1991) 915.
- 1-79) 刈込勝比古, 大森 整: 鋳鉄ボンド酸化セリウム砥石の開発と ELID 鏡面研削, 砥粒加工

学会誌, 39, 4 (1995) 214.

1-80) 大森 整, 中川威雄: 青銅ボンド砥石の電解ドレッシング, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989) 321.

1-81) 高橋一郎, 大森 整, 中川威雄: 直流電源による青銅ボンド砥石の電解ドレッシング効果, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 729.

1-82) 大森 整, 吉岡伸宏, 中川威雄: コバルトボンド砥石による電解ドレッシング研削, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 1013.

1-83) 伊藤伸英, 大森 整: メタルレジンボンド砥石によるELID研削特性, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 583.

1-84) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 交流電源による電解ドレッシング研削 (第1報: シングル電極による交流ELID), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 927.

1-85) 高橋一郎, 大森 整, 中川威雄: スイッチング電極による電解ドレッシング研削, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 929.

1-86) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: ドレッシング用電解電源に関する考察 (第2報: コンデンサ電源の適用効果), 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 727.

1-87) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: ドレッシング用電解電源に関する考察, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 201.

1-88) 大森 整: ELID研削の要素構成に関する研究 (第1報: メタルボンド砥石と電解波形の影響), 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 581.

1-89) 川口祐司, 大森 整, 田中俊次: 酸化チタンの超精密ELID研削, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 587.

1-90) ジョンソン株式会社: 公開特許公報, 平2-256419, (1990).

1-91) 大森 整, 高橋一郎, 中川威雄: 電解ドレッシング用研削液要因の考察, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 725.

1-92) 大森 整, 中川威雄: 電解ドレッシング用研削液要因の考察 (第2報: 研削液種要因の影響), 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 917.

1-93) 大森 整: 電解ドレッシング用研削液要因の考察 (第6報: 純水希釈型研削液の試作), 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 145.

1-94) L.A. Zadeh: Fuzzy Algorithms, Information and Control, 12 (1968) 94.

1-95) L.A. Zadeh: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process, IEEE Transaction on SMC, SMC-3, 1 (1973) 28.

1-96) 菅野道夫: Fuzzy 測度と Fuzzy 積分, 計測自動制御学会論文集, 8, 2 (1972) 218.

1-97) E.Mamdani: Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller, Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 8, No. 6 (1976) 669.

1-98) L. P. Holmblad and J. J. Ostergaard: Control of a Cement kiln by Fuzzy Logic, in Fuzzy Information and Decision Processes (M. M. Gupta and E. Sanchez, eds.), North-Holland, Amsterdam (1982).

1-99) 山崎 東, 菅野道夫: 自動学習ファジーコントローラ, 計測自動制御学会論文集, 20, 8 (1984) 50.

1-100) 豊嶋敏雄, 柴坂敏郎, 宅間正則, 北澤昌昭: 旋削加工における状態監視システムに関する研究 (第1報) - ファジィ積分モデルによる工具交換時期の評価 -, 精密工学会誌, 58, 5 (1992) 993.

1-101) 酒井義郎, 友貞賢二: 切削加工における状態監視システムについて, 日本機械学会論文集 C編, 53, 485 (1987) 255.

1-102) 宅間正則, 柴坂敏郎, 北澤昌昭, 豊嶋敏雄: 旋削加工における状態監視システムに関する研究 (第2報) - ニューラルネットワークによるファジィ積分モデルの適用 -, 精密工学会誌, 60, 7 (1994) 1014.

1-103) 松村 隆, 帯川利之, 白樫高洋, 白井英治: 最適切削条件選定用エキスパートシステムの開発に関する研究 (第2報) - 加工精度・仕上げ面粗さ評価用サブシステム -, 精密工学会誌, 57, 6 (1991) 1053.

1-104) 中島利勝, 塚本真也, 村上大介, 倉田勝弘: ファジィ・インプロセス制御研削加工 - 研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究 (第1報) -, 精密工学会誌, 58, 2 (1992) 313.

1-105) 中島利勝, 塚本真也, 村上大介, 倉田勝弘, 安田浩隆: ファジィ・インプロセス制御による研削加工の最適化 - 研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究 (第2報) -, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2057.

1-106) 中島利勝, 塚本真也, 村上大介, 倉田勝弘, 安田浩隆: ファジィ・インプロセス制御による研削加工の最適化 - 研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究 (第2報) -, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2057.

1-107) 中島利勝, 塚本真也, 村上大介, 倉田勝弘: ファジィ・インプロセス制御研削加工 - 研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究 (第1報) -, 精密工学会誌, 58, 2 (1992) 313.

1-108) 中島利勝, 塚本真也, 村上大介, 安田浩隆: ニューロ&ファジィ・インプロセス制御研削加工 - 研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究 (第3報) -, 精密工学会誌, 59, 8 (1993) 1313.

第2章 電解インプロセスドレッシング、 ファジィ制御および加工特性の評価方法 についての理論的検討

2.1 緒言

砥石の切れ味を意図的に変化させ、超仕上加工の加工状態を制御するため、本研究では電解インプロセスドレッシングを超仕上加工に併用する。電解インプロセスドレッシングの電気量等をコントロールすることにより、砥石作業面の状態を意図的に制御することが可能となり、様々な加工状態を作り出すことが期待できる。

本章では電解インプロセスドレッシングの基本原理および加工特性の制御に利用したファジィ制御について述べる。

電解インプロセスドレッシングは近年研削加工において用いられているメタルボンド砥石を対象とするドレッシング方法である。電解インプロセスドレッシングはドレッシング効果が砥石の砥粒保持力に依存しないという利点を持っている²⁻¹⁾⁻²⁻⁵⁾。また、電気分解のための特別な加工液を必要としないために工作機械自体が加工液によって腐食されることもなく、比較的単純な電解装置により実現可能である²⁻⁶⁾⁻²⁻¹⁰⁾。電解インプロセスドレッシングとは砥石（陽極）に対偶する電極（陰極）との間に電解液の役割を兼ねる加工液を注入し、両極に電圧を加えることによる極間の電解作用を利用するドレッシング方法である。砥石中のボンド剤のみを溶出させることによりドレッシング効果が期待できる。難ドレッシング性を有するメタルボンド砥石に有効なドレッシング方法である。

本研究では意図的に砥石の自生作用をコントロールするため、従来の研削機構の解析においてなされているような『砥粒は脱落したり磨耗したりせず、切れ刃の形状は変化しない』とする仮定をそのまま用いることはできない。このような場合、個々の砥粒切れ刃に注目することはせず、巨視的に砥石を1個の工具とみなして加工過程をモデル化して扱う解析手法²⁻¹¹⁾⁻²⁻¹³⁾が有効となる。

そこで本章では巨視的に砥石を一つの切削工具とみなし、加工状態の過酷さを把

握するための評価関数を理論的に導出する。導出する評価関数を用いることにより、加工条件の過酷さを把握できるだけでなく、加工材料の被削性、砥石の切削性などの判定が可能となり、さらに加工能率・生産性・精度レベルなどの点に関して、研削加工、ホーニング加工といった他の加工方法と統一的に同一規準で比較することも可能となる²⁻¹⁴⁾。

また、本研究では従来の円筒超仕上で用いられている角柱状砥石の代わりにリング状の砥石を用いる。このため、砥石-加工物間の接触状態は従来のものとは異なってくる。そこでリング状砥石を用いた円筒超仕上における砥石-加工物間の接触状態についても考察を加える。

2.2 電解インプロセスドレッシング

2.2.1 電解インプロセスドレッシングの原理

メタルボンド砥石は砥粒保持力が強く、砥石寿命が長い反面、難ドレッシング/ツルレーイング性という欠点を持っている。電解インプロセスドレッシングは電解作用による陽極（砥石）の溶出を利用したドレッシング方法ゆえ、砥粒保持力にドレッシング効果が依存せず²⁻¹⁾⁻²⁻⁵⁾、砥粒保持力の強い各種メタルボンド砥石に対して有効であると考えられる。

電解インプロセスドレッシングではメタルボンド砥石を陽極とし、陰電極を砥石作業面（加工に寄与しないエアカット部）に対偶して設置し、両極の間に加工液を介して極間に電圧を加えることにより電解作用を生じさせている。このとき加工液は一種の電解液としての役割を果たす。極間に電圧を加えることにより電極-加工液-砥石間に電位傾度を持った電界が形成され、この電界形成により電解作用を生じ、陽極である砥石ボンド部の金属が正に帯電したイオンとなり溶出する。メタルボンド部分のみが溶出する結果、砥粒が突き出し、ドレッシング効果が得られることになる。図2-1に本研究で用いる電解インプロセスドレッシング装置の主要部を示す。

電解インプロセスドレッシングにおいて電解作用はあくまでも砥石ボンド剤のみに作用し、加工物は電解作用を受けない。この点が電解研削と大きく異なる点であ

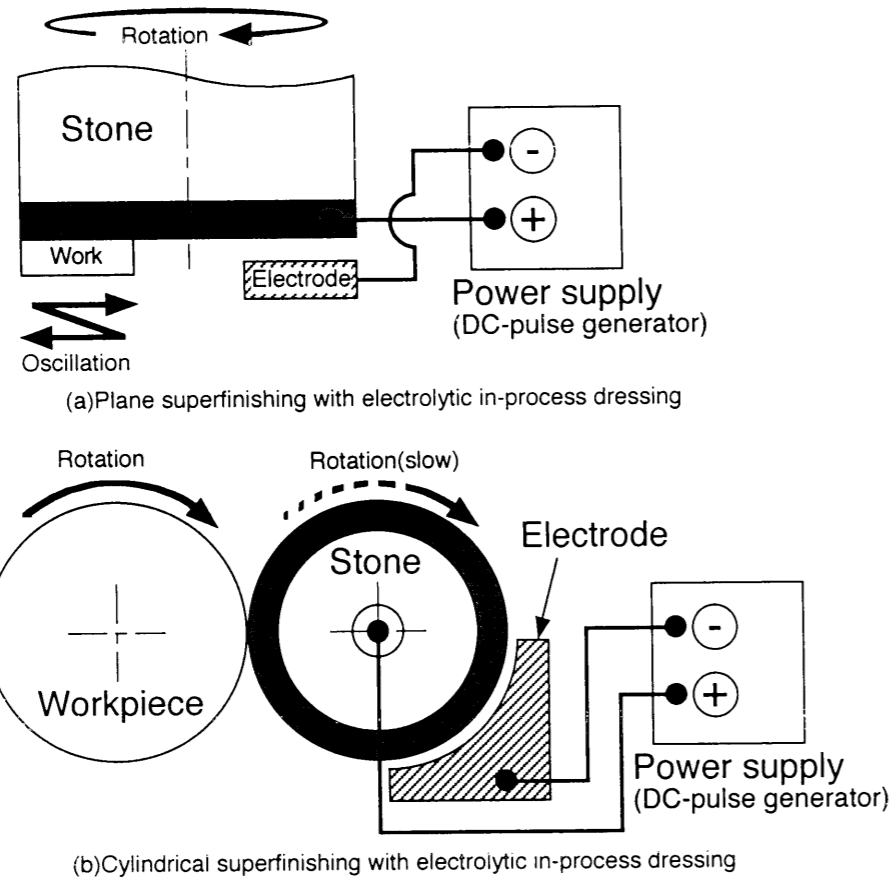


Fig. 2-1 Main parts of electrolytic in-process dressing

る。

電氣的なドレッシング方法では砥粒周囲のボンド剤を集中的に溶出する『歯槽膿漏現象』が生じる場合がある。しかし、機械的ドレッシングで生じやすいボンドテールが生じないため加工物との摩擦抵抗は小さくなるという利点を持っている²⁻⁸⁾。ドレッシング効果を失わず、『歯槽膿漏現象』を抑えるためには加工法に適した電解条件を与えてやる必要がある。

ここで電解ドレッシングによる砥石および加工液の反応について簡単な説明を加える。砥石に鉄系メタルボンド砥石を用い、加工液としてNaCl溶液を用いた場合、次のような反応を生じる。

NaCl 溶液は正に帯電したNa⁺イオンと負に帯電したCl⁻イオンとに分かれる。



また同時に溶媒である水も水素イオンと水酸イオンに解離する。

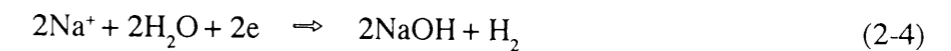


NaCl 溶液中では電荷の移動はNa⁺, Cl⁻, H⁺, OH⁻イオンの移動によって行われる。

一方、砥石ボンド剤は、



電極（陰極）側では、



のような反応が生じ、ボンド剤は溶解し、電極から水素ガスが発生する。ボンド剤の溶解より生じたFe²⁺は加工液の電気分解より生じるOH⁻と結合し、Fe(OH)₂またはFe(OH)₃を生じる。Fe(OH)₃はFe₂O₃等の酸化物となり、砥石表面に不導体被膜を形成する^{2-15), 2-16)}。生成された不導体被膜の厚さおよび剥離性は加工性能に大きな影響を与えるものと思われる。本研究では不導体被膜の生成は切りくず排出能力の低下につながると考え、不導体被膜をほとんど生成しない青銅系メタルボンド砥石を用いる^{2-17), 2-18)}。鉄系メタルボンド砥石の代わりに青銅系メタルボンド砥石を用いると式(2-3)は、



となり、酸化物である Cu_2O 、 CuO 等を生成する。実験では加工液として一般の研削液（防錆剤としてアミンを含有）を用いるため、アミンとの錯体反応によりキレートを生成する^{2-17), 2-19)}。そのため、青銅系メタルボンド砥石を用いた場合、酸化膜は固定されず、砥石表面にほとんど不導体被膜を生成することはない。図 2-2 に鉄系メタルボンド砥石を用いた場合と青銅系メタルボンド砥石を用いた場合の電解ドレッシングの模式図を示す。

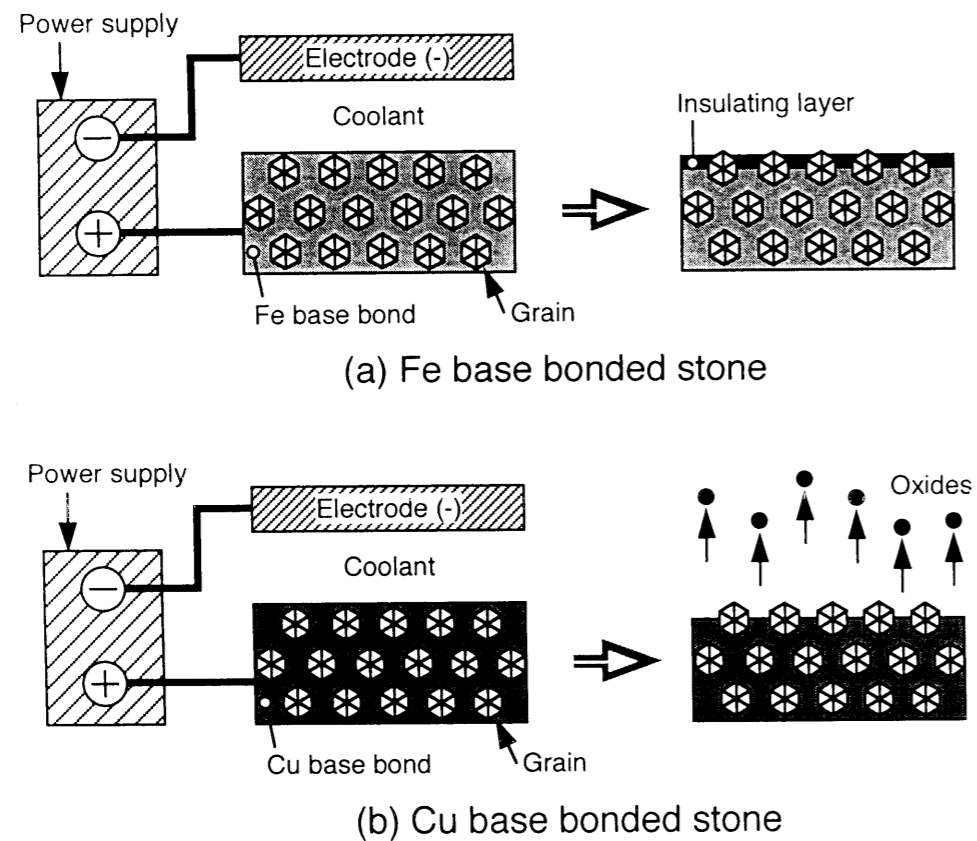


Fig. 2-2 Schematic illustration of electrolytic dressing
(a) Fe base bonded stone (b) Cu base bonded stone

2.2.2 超仕上加工における電解インプロセスドレッシング

超仕上加工は一般の研削加工とはいくつかの点で異なる特徴を有する。特に電解インプロセスドレッシングを超仕上加工に適用する上で考慮すべき点は、超仕上

加工に使用する砥石の粒度が細かいことと定圧加工であることである。

微細砥粒砥石に電解ドレッシングを適用する場合、あまり強い電解作用を加えると『歯槽膿漏現象』により砥粒保持力が弱まり砥粒脱落が激しくなる。そのため使用砥石および加工物にとって適当な電解強度でドレッシングを行わねばならない。また、定圧加工であるため、切れ味の低下は切削抵抗（接線方向分力）の低下となってあらわれる。

本研究では電解電源に直流パルス電源を使用する。直流パルス電源より供給される電圧のオンタイム、オフタイムの定義を図 2-3 に示す。全加工時間中に占めるオンタイムの比率は電解条件のなかでも特に重要な要素の 1 つであり、その比率を n_e とおくと式 (2-3) のように定義される。

$$n_e = \frac{\text{On-time}}{1 \text{ Cycle}} \times 100 \% \quad (2-3)$$

電極間隙も電解条件の重要な要素の 1 つである。両極間の間隙を狭くすれば電解効率が良くなり、電解される砥石の形状変化も極力抑えることができるが、加工液が間隙に流入し難くなる。一方、間隙を広くすれば間隙への加工液流入は容易となるが電解の効率は悪くなり、電解される砥石の形状が崩れることもあり得る。良好な加工状態を維持するためには電極間隙も加工物の特性（塑性変形の難易度等）や他の電解条件（加工液の導電率、電極面積等）により適宜変化させるべきである。

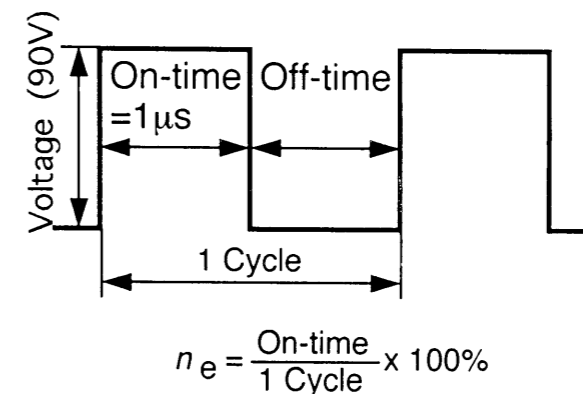


Fig. 2-3 Definition of pulse for DC pulse power supply

2. 2. 3 電解速度の検討

電解インプロセスドレッシングを施すことにより、砥石作業面は後退し、電極とのギャップが変化する。ギャップが変化すると、電解強度が変化するため安定したドレッシングを継続して行うことが困難となる。そこでファラデーの法則をもとに導出された電解加工の理論式^{2,20)}を応用して電解速度 v_i およびギャップ y の時間的变化を調べた。

ファラデーの法則より電流 I が時間 $\Delta\tau_d$ 間流れた時に溶出するボンド量は

$$w_i = \frac{M_i I \Delta\tau_d}{n_i F} \quad (2.4)$$

電解は深さ方向にのみ生じるため、砥石面後退量 Δl は、

$$\Delta l = \eta \frac{M_i I \Delta\tau_d S_r}{n_i F \gamma_i S} \quad (2.5)$$

電解ドレッシング速度 v_i は

$$v_i = \frac{\Delta l}{\Delta\tau_d} = \eta \frac{M_i I S_r}{n_i F \gamma_i S} \quad (2.6)$$

導電率 κ 、ギャップ y 、電圧降下 E とすると、 $I = E\kappa S/y$ より

$$v_i = \eta \frac{M_i \kappa E S_r}{n_i F \gamma_i} \cdot \frac{1}{y} \quad (2.7)$$

ここでボンドは合金で、その中に砥粒を含むこと、電解中に液温が上昇すること及び気泡が発生することなどを考慮すると

$$v_i = \eta \frac{(\kappa_0(1 + \Delta T_c \alpha)(1 - \beta)^{3/2}) n_e E S_r (1 + G_d \gamma_g^{-1})}{F \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \cdot \frac{1}{y} = s \frac{1}{y} \quad (2.8)$$

ここで s は、

$$s = \eta \frac{(\kappa_0(1 + \Delta T_c \alpha)(1 - \beta)^{3/2}) n_e E S_r (1 + G_d \gamma_g^{-1})}{F \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \quad (2.8)$$

従って、 $v_i = dy/d\tau$ よりギャップ y が求まる。ここで、加工中 s は変化しないとし、 $\tau=0$ で $y=y_0$ とすると

$$y = (y_0^2 + 2s\tau_d)^{1/2} \quad (2.9)$$

が得られる。

図2-4に電解時間と砥石溶出速度との関係の一例を示す。図中の曲線は、加工液を砥石-電極間に流入させて極間に電圧を加えた場合の砥石表面の溶出速度を理論的に求めた結果である。砥石に青銅系メタルボンドダイヤモンド砥石*を用い、加

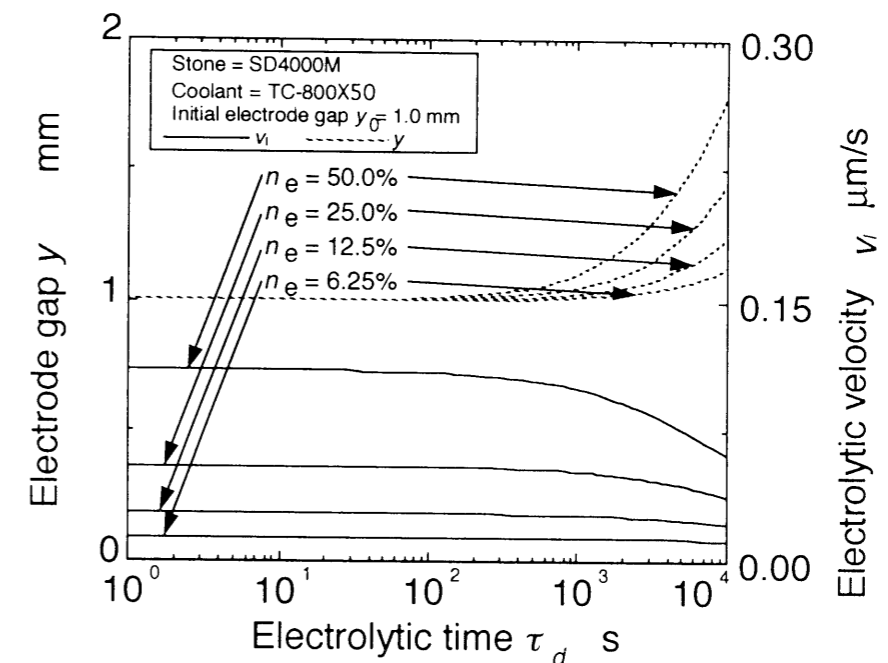


Fig. 2-4 Relation between electrolytic time and velocity of dissolution of stone

* (株) ミズホ製, SD4000M

工液にはソリュブルタイプの研削液**を用いた場合である。表2-1に使用砥石及び加工液を示す。図より砥石の溶出速度変化および溶出による砥石-電極間の距離変化は非常に小さいことが分かる。

Table 2-1 Used materials

Stone	
Bond compound	Bronze
Concentration	100
Bending strength	200MPa
Grain material	Synthetic diamond
Grain size	#4000
Coolant	
Coolant type (JIS)	W2-1
Coolant temperature	298K
Resistivity	8.7
pH (X30)	35.5
Surface tension (X30, 10 ⁻³ N/m)	812Ωcm

2. 3 ファジィ制御

ファジィ制御は人間の判断など、曖昧さを含む制御アルゴリズムを if-then 形式で表現し、ファジィ推論を用いてコンピュータに実行させるものである。微積分方程式などの数式モデルを用いる方法とは異なるといえば言語モデルに基づく手法である。この手法は熟練技術者の経験と勘に基づく主観的知識を表現するのに極めて都合の良い方法である。そのため従来の数式モデルで表現できなかった問題に対しても有用である。しかし、ファジィ制御では理論的に解析を展開するのに重要な微分可能性を max, min 演算が保有しないために従来の制御理論で重要視されてきた安定性や信頼性に関する理論がなく、安定判別などを統一的に示す理論が未完成である。このためファジィ制御の適用には十分な動作試験を行う必要がある^{2.21)}。

** 日本グリース製, TC-800X50

ファジィ制御の形式は、前件部と後件部の形式、メンバーシップ関数の型、推論法の3つの点から分類されるが、これらは相互に関連があり、必ずしも独立ではない。以下にそれぞれについての説明を行う。

前件部と後件部の形式で一般的によく用いられるのは if-then 形式のものである。これは入力情報を x_1, x_2 とし、制御対象への出力を y とすると if (前件部) -then (後件部) 型のファジィ制御ルールは以下のように記述される。

Rule 1 if x_1 is Small and x_2 is Big then y is Medium
 Rule 2 if x_1 is Medium and x_2 is Medium then y is Big
 ⋮ ⋮
 Rule n if x_1 is Big and x_2 is Small then y is Small

このように複数のルールを用い、そのルールの協調により推論結果を導き出す。if-then形式で表現することにより数式表現が困難な制御対象に対しても簡単に適用可能である。

メンバーシップ関数の型には連続型と離散型があり、さらに連続型は紡錘型と三角型に大きく分類される。図2-5に三角型メンバーシップ関数の一例を示す。紡錘型と三角型では紡錘型メンバーシップ関数の方が多少スムーズな制御が可能となるが、本研究では実行速度の点で有利な三角型を基本としたメンバーシップ関数を用いる。

ファジィ制御で用いる推論法には大別して直接法と間接法^{2.22)}とがあるが、間接

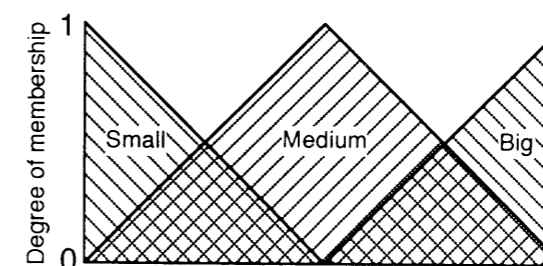


Fig. 2-5 Example of triangle membership function

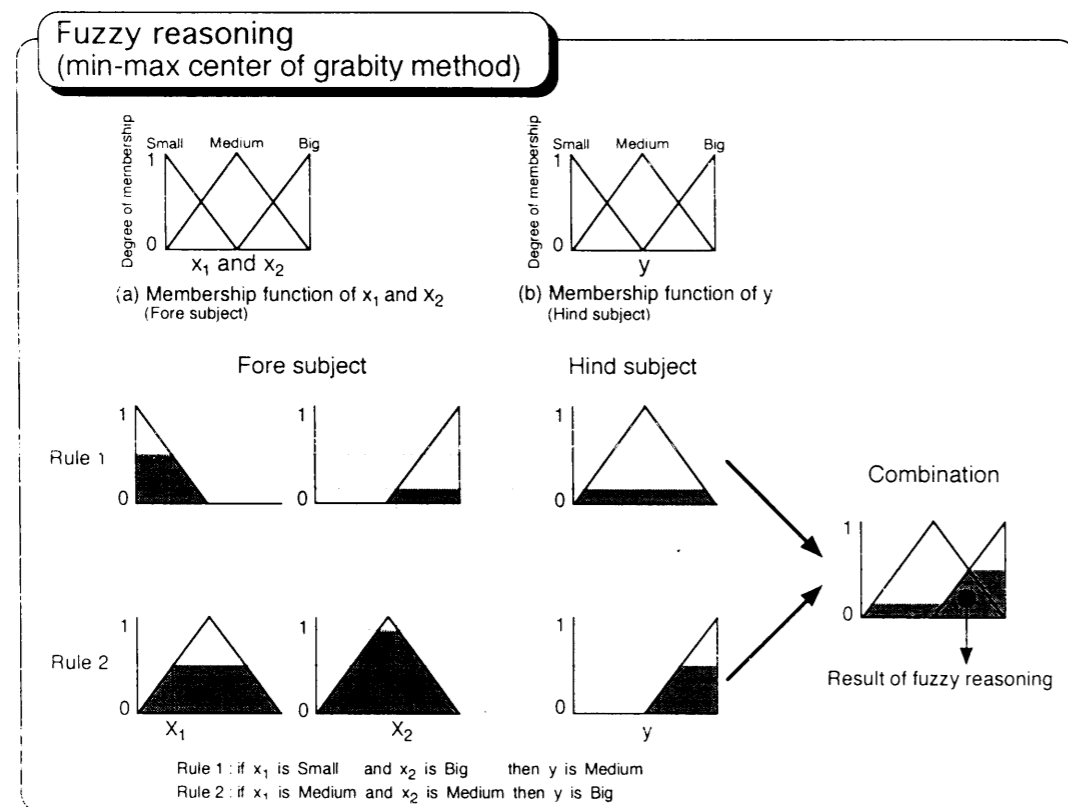


Fig. 2-6 Main method of fuzzy reasoning (min-max center of gravity method)

法は推論手順が複雑で、現状ではあまり一般的ではない²⁻²¹⁾。直接法にはproduct-sum重心法²⁻²³⁾、簡略推論法^{2-24) ~ 2-26)}、関数型推論法等²⁻²⁷⁾があるが、ファジィ制御の推論方法としてE.Mamdaniにより提案されたmin-max重心法²⁻²⁸⁾が最も一般的である。そこで本研究でもmin-max重心法を採用する。図2-6に制御ルールがRule 1とRule 2の二つから成る場合のmin-max重心法的主要な推論手順を示す。まず、各前件部の適合度を求め、最小のメンバーシップ値を求める。前件部のメンバーシップ値から後件部のメンバーシップ値を算出する。計算された各制御ルールの推論結果を統合して制御ルール全体の推論結果を計算する。この制御ルール全体の推論結果の重心を制御対象へ出力する。

ファジィ制御における推論方法を以上に述べてきたが、これらよりファジィ制御の特徴として次のようなことが言える。

従来の制御では、 $u=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ といった形の制御式より制御対象からの情

報 x_1, x_2, \dots, x_n を得て操作量 u を決定していた。しかしファジィ制御では前述のような制御式は必要なく、複数個のif-then型の式で u を決定することができる。すなわち、熟練者の知識や経験を十分に生かして、簡単な言語的表現を用いて制御を行うことが可能になるわけである。特に超仕上加工等の砥粒加工では、工具にあたる砥粒切れ刃の複雑な挙動を数式化することは困難を極める。このような理由からもファジィ制御は超仕上加工の加工特性の制御に適していると言える。さらに、制御の目的が複数個ある時、目的別の制御ルールを作っておき、それらの制御ルールを区別することなく並列に置いて推論を行うことができる。

本研究では、超仕上加工において2方向の加工抵抗と加工経過時間から砥石押し付け力と電解インプロセスドレッシングの電気量の操作量を出し、加工状態を制御することを目的としている。ドレッシング効果をコントロールすることによって加工状態を制御するため、砥粒の挙動は通常の研削加工に比べ非常に複雑なものになってしまう。このことから本研究ではファジィ推論を用いるのが効果的であると思われる。

2. 4 砥石平均切込み深さ \bar{d} の導出

2. 4. 1 平面超仕上における \bar{d} の導出

外径 d_o 、内径 d_i の円盤状砥石が振動数 n 、振幅 a で振動している長さ L_w 、幅 B_w 、厚さ H_w の加工物（加工面積 $L_w \times B_w$ ）を砥石回転周速度 V_s で加工している状態を考える。このとき加工物長さ L_w 、砥石幅 $(d_o - d_i) / 2$ 、振幅 a の大小関係により、次の5つの場合分けが考えられる。

- (1) $L_w < (d_o - d_i) / 2$ $a > \{ (d_o - d_i) / 2 - L_w \} / 2$
- (2) $L_w < (d_o - d_i) / 2$ $a < \{ (d_o - d_i) / 2 - L_w \} / 2$
- (3) $L_w = (d_o - d_i) / 2$
- (4) $L_w > (d_o - d_i) / 2$ $a > \{ L_w - (d_o - d_i) / 2 \} / 2$
- (5) $L_w > (d_o - d_i) / 2$ $a < \{ L_w - (d_o - d_i) / 2 \} / 2$

ここでは(3)の場合、すなわち、砥石幅と加工物長さとが一致する場合を取り上げて解析することにする。なお、求めた解は他の場合にも簡単に適用することができる。図2-7に砥石と加工物の寸法記号を、図2-8に加工物振動の模式図を示す。図2-8のように座標軸をとると加工物の中心の通る軌跡は、

$$y = \delta R(\theta) = a \sin W\theta \quad (2-10)$$

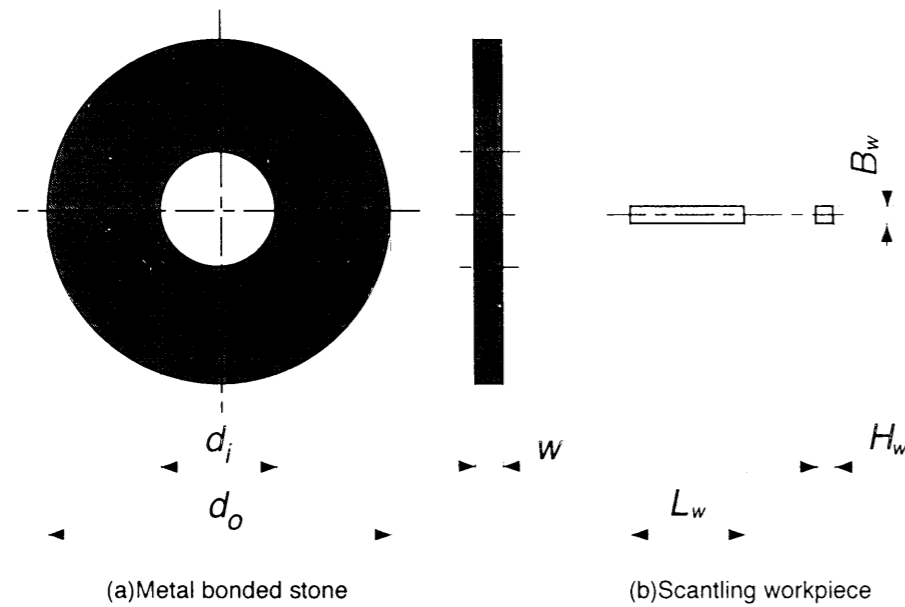


Fig. 2-7 Dimension of stone and scantling workpiece

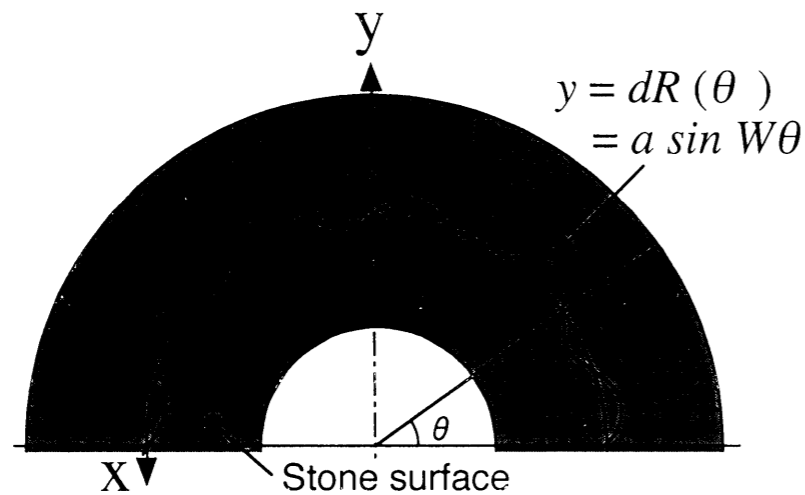


Fig. 2-8 Schematic illustration of expansion of working surface (Plane superfinishing)

と表される。ここで、 W は砥石1回転の間の加工物振動数である。ゆえに加工物外端の描く軌跡を $\delta R_o(\theta)$ 、内端の描く軌跡を $\delta R_i(\theta)$ とすると、

$$\delta R_o(\theta) = a \sin W\theta + d_o/2 \quad (2-11)$$

$$\delta R_i(\theta) = a \sin W\theta + d_i/2 \quad (2-12)$$

砥石が1回転する間に加工物がオーバーランする面積 A_o は、

$$A_o = \frac{1}{2} \left[\int_0^{T/2} \left\{ (\delta R_o(\theta))^2 - \left(\frac{d_o}{2}\right)^2 \right\} d\theta + \int_{T/2}^T \left\{ \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 - (\delta R_i(\theta))^2 \right\} d\theta \right] \quad (2-13)$$

となる。砥石が1回振動する間に加工物が通過する砥石表面積 A_s は、砥石のオーバーランを考慮して、

$$A_s = \frac{1}{W} \left\{ \left(\frac{d_o^2}{4} - \frac{d_i^2}{4} \right) \pi - d_i a \right\} \quad (2-14)$$

と表される。また、加工時間 τ の間に加工物が通過する全砥石表面積 ΣA_s は、

$$\Sigma A_s = \frac{1}{W} \left\{ \left(\frac{d_o^2}{4} - \frac{d_i^2}{4} \right) \pi - d_i a \right\} n\tau \quad (2-15)$$

ここで τ の間、定常加工状態にあるとすると、砥石は一定の切込み深さ \bar{d} で加工していることになり、 $(\Sigma A_s \cdot \bar{d})$ の加工物を切削したこととなるから加工量 ΔD は、

$$\Delta D = \Sigma A_s \cdot \bar{d} \quad (2-16)$$

また、加工物厚さ減少量を δH_w とすると ΔD は、

$$\Delta D = L_w \cdot B_w \cdot \delta H_w \quad (2-17)$$

式 (2-16) , (2-17) を等置して、

$$\bar{d} = \frac{L_w B_w \delta H_w}{\sum A_s} \quad (2-18)$$

が得られる。

よって、式 (2-15) , (2-18) より \bar{d} は、

$$\bar{d} = \frac{2\pi L_w B_w (d_o + d_i)}{V_s \{(d_o^2 - d_i^2)\pi - 4d_i a\}} \cdot \frac{\delta H_w}{\tau} \quad (2-19)$$

ここで $\tau \rightarrow 0$ とすると、

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\delta H_w}{\tau} = \frac{d(\delta H_w)}{d\tau} \quad (2-20)$$

と置き直すことができる。 $d(\delta H_w)/d\tau$ は任意の時刻における加工物の厚さ減少速度 (定切込み加工では切込み速度に相当) であり、式 (2-19) を書き直すと結局砥石切込み深さ \bar{d} は、

$$\bar{d} = \frac{2\pi L_w B_w (d_o + d_i)}{V_s \{(d_o^2 - d_i^2)\pi - 4d_i a\}} \cdot \frac{d(\delta H_w)}{d\tau} \quad (2-21)$$

で与えられる。

\bar{d} は砥石の平均的な切込み深さを表わしており、 $d(\delta H_w)/d\tau$ の値の取り方で評価の対象が変わる。定切込み加工の場合、 $d(\delta H_w)/d\tau$ を設定切込み速度と考えると、 \bar{d} は設定された加工条件だけで決まることになり、実験を行うことなく各加工条件それぞれの過酷さへの影響を知ることができる。これに対し、 $d(\delta H_w)/d\tau$ を加工実験

で求まる加工物厚さ減少速度と考える時、 \bar{d} の値の大小により加工条件の過酷さ、砥石の切れ味、加工材料の被削性などを判定できる。 \bar{d} の値が大きければ、それは加工が能率良く行われていることを示しており、逆に \bar{d} が小さければ、それは加工能率が低いことを示していることとなる。

2. 4. 2 円筒超仕上における \bar{d} の導出

振動数 n 、振幅 a で振動する 1 本の角柱状砥石 (作業面積 $l \times b$) が直径 D 、幅 B の円筒状の加工物外面を加工物周速度 V_w で加工している状態を考える。このとき加工物幅 B 、砥石幅 b 、振幅 a の大小関係により、次の 5 つの場合分けが考えられる。

- (1) $b < B$ $a > (B - b) / 2$
- (2) $b < B$ $a < (B - b) / 2$
- (3) $b = B$ $(B - b) / 2 = 0$
- (4) $b > B$ $a > (B - b) / 2$
- (5) $b > B$ $a < (B - b) / 2$

ここでは、最も一般的な加工条件と考えられる (1) の場合、すなわち砥石幅 b が加工物の幅 B よりも小さく、かつ砥石の振動により正のオーバーラン (砥石突き出し量) を生じる場合のみを取り上げて解析することにする。なお、解析より求めた解は他の場合にも簡単に適用することができる。

図 2-9 にリング状加工物およびリング状砥石の寸法記号を、図 2-10 に加工物表面を軸方向に展開した模式図を示す。図に示すように砥石は加工物上をサインカーブを描きながら加工する。図のように x 軸、 y 軸を定めると砥石の振動は、

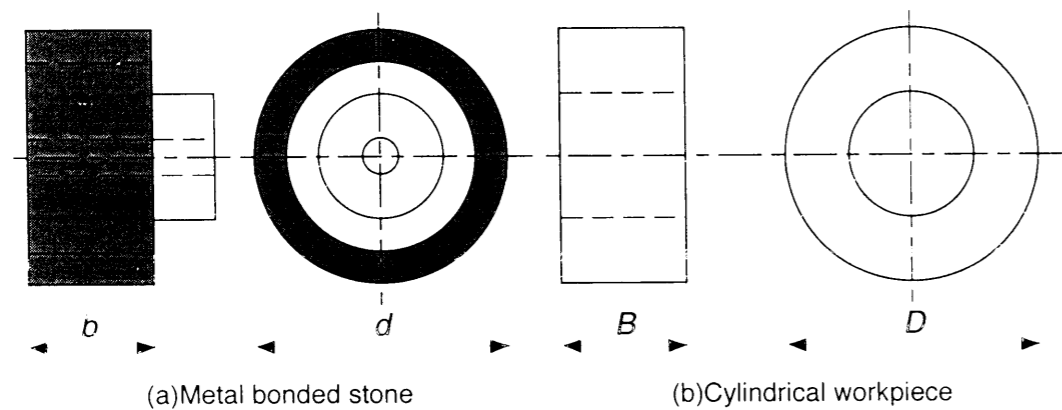


Fig. 2-9 Dimension of ring type stone and cylindrical workpiece

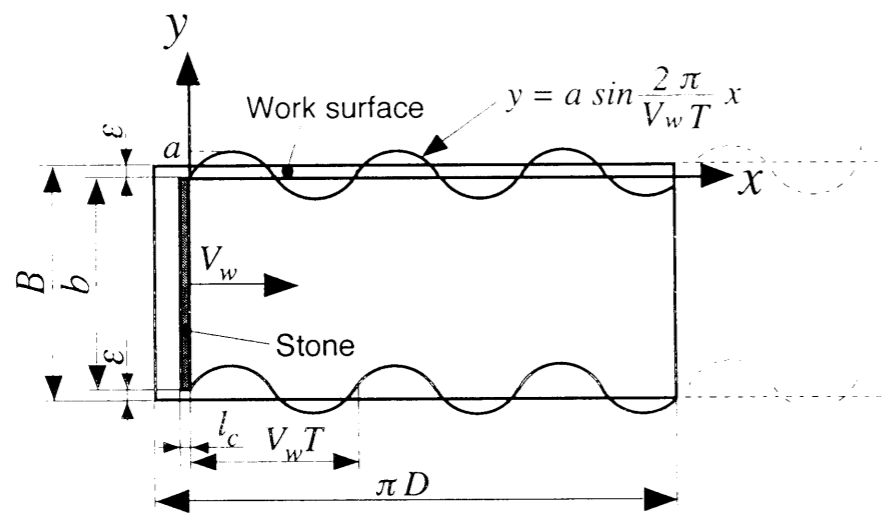


Fig. 2-10 Schematic illustration of expansion of working surface (Cylindrical superfinishing)

$$y = a \sin 2\pi n \tau = a \sin \frac{2\pi n}{V_w} x \quad (2-22)$$

で表わされる. $(B-b)/2 = \epsilon$ とおくと, 1回の振動の間に砥石が掃く加工物表面積 A_s は, 砥石のオーバーランを考慮して,

$$A_s = \frac{V_w}{n\pi} \left\{ \pi l - 2a \cos \left(\sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) + \epsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\epsilon}{a} \right) \right\} \quad (2-23)$$

となる.

ところで, 砥石と加工物の接触面積は一定ではなく, オーバーランのところ小さくなる. そこで解析を簡単にするため, 砥石を平均切れ刃幅 (砥石幅) $b_c = A/b$ を持つモデル砥石に置き換え, 接触面積が常に一定であるとして扱うことにする. このとき, L は 1回の振動の間に砥石が動く距離 (砥石の軌跡) であり, 第2種楕円積分 $E(k)$ を用いて次のように表わされる.

$$L = \frac{4V_w}{\omega} (1+K^2)^{1/2} E(k) \quad (2-24)$$

ただし $K = \frac{a\omega}{V_w}$, $k^2 = \frac{K^2}{1+K^2}$ である.

一方, 加工時間 τ の間にモデル砥石が掃く全加工面積 ΣA は,

$$\Sigma A = n\tau A \quad (2-25)$$

と表される. ここで τ の間, 定常加工状態にあるとすると, 砥石は一定の切込み深さ \bar{d} で加工していることになり, $(\Sigma A_s \cdot \bar{d})$ の加工物を切削したこととなるから加工量 ΔD は,

$$\Delta D = \Sigma A \cdot \bar{d} \quad (2-26)$$

τ の間の加工物半径減少量を δR とすると, この間の ΔD は

$$\Delta D = \pi DB \delta R \quad (2-27)$$

であることから, 式 (2-26), (2-27) を等置して

$$\bar{d} = \frac{\pi DB \delta R}{\Sigma A} \quad (2-28)$$

が得られる。従って式 (2-28) に式 (2-23), (2-25) を代入すると,

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w} \left\{ \pi l - 2a \cos\left(\sin^{-1} \frac{\varepsilon}{a}\right) + \varepsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\varepsilon}{a} \right) \right\}^{-1} \frac{\delta R}{\tau} \quad (2-29)$$

となる。ここで $\tau \rightarrow 0$ とすると,

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\delta R}{\tau} = \frac{d(\delta R)}{d\tau} \quad (2-30)$$

と置き直すことができる。 $d(\delta R)/d\tau$ は任意の時刻における加工物の半径減少速度 (定切込み加工では切込み速度に相当) であり, 式 (2-29) を書き直すと結局砥石切込み深さ \bar{d} は

$$\bar{d} = \frac{\pi^2 DB}{V_w} \left\{ \pi l - 2a \cos\left(\sin^{-1} \frac{\varepsilon}{a}\right) + \varepsilon \left(\pi - 2 \sin^{-1} \frac{\varepsilon}{a} \right) \right\}^{-1} \frac{d(\delta R)}{d\tau} \quad (2-31)$$

で与えられることになる。

\bar{d} は砥石の平均的な切込み深さを表わしており, $d(\delta R)/d\tau$ の値の取り方で評価の対象が変わる。定切込み加工の場合, $d(\delta R)/d\tau$ を設定切込み速度と考えると, \bar{d} は設定された加工条件だけで決まることになり, 実験を行うことなく各加工条件それぞれの過酷さへの影響を知ることができる。これに対し, $d(\delta R)/d\tau$ を加工実験で求まる加工物半径減少速度と考えるとき, \bar{d} の値の大小により加工条件の過酷さ, 砥石の切れ味, 加工材料の被削性などを判定できる。 \bar{d} の値が大きければ, 電解ドレッシングの効果により砥石の切れ味が良好であることを示しており, 逆に \bar{d} が小さければ, 砥石の切れ味が低下していることを示している。

2.5 比加工エネルギー k_s の導出

比加工エネルギー k_s の導出は, 平面超仕上, 円筒超仕上とも同様である。ここでは, 円筒超仕上の場合を例にとり比加工エネルギー k_s の導出を行う。

振動数 n で振動する砥石は加工時間 τ の間に距離 ($n\tau L$) を加工することになる。

この間, 砥石に作用する加工抵抗 F_i より, 砥石がなす仕事は,

$$F_i n \tau L \quad (2-32)$$

この間の加工量を ΔD とすると, 単位体積の切屑を生成するのに必要な比加工エネルギー k_s は

$$k_s = \frac{n F_i \tau L}{\Delta D} = \frac{n F_i \tau L}{\pi DB \delta R} \quad (2-33)$$

となる。 $\tau \rightarrow 0$ とし, 式 (2-24) を代入すると,

$$k_s = \frac{2 F_i V_w}{\pi^2 DB} (1 + K^2)^{1/2} E(k) \frac{1}{d(\delta R)/d\tau} \quad (2-34)$$

となり, 切込み深さ \bar{d} のときの k_s が求まる。 k_s の導出方法は円筒超仕上, 平面超仕上両者において全く同一である。なお, k_s は加工に要するエネルギーを表しており, k_s の大小により加工効率を判断できる。

2.6 砥石—加工物間の接触状態

本研究では電解インプロセスドレッシングを超仕上加工に適用するため, 従来の円筒超仕上装置とは異なり, 角柱状砥石の代わりにリング状砥石を用いる。図2-11に砥石の模式図を示す。角柱状砥石の代わりにリング状砥石を用いることで砥石—加工物間の接触状態が面接触から線接触に近い状態となる。砥石の形状の違いによる加工形態への影響を調べるため, 角柱状砥石を用いた場合とリング状砥石を用いた場合との砥石—加工物間の接触面積の違いを調べた。砥石—加工物間の接触面積が大きければ, 加工物表面に加わる単位面積当たりの砥石圧力が小さくなる。また, 加工液が砥石—加工物間に流入し難くなる。逆に砥石—加工物の接触面積が小さければ, 加工物表面に加わる単位面積当たりの砥石圧力が大きくなり, 加工液は砥石

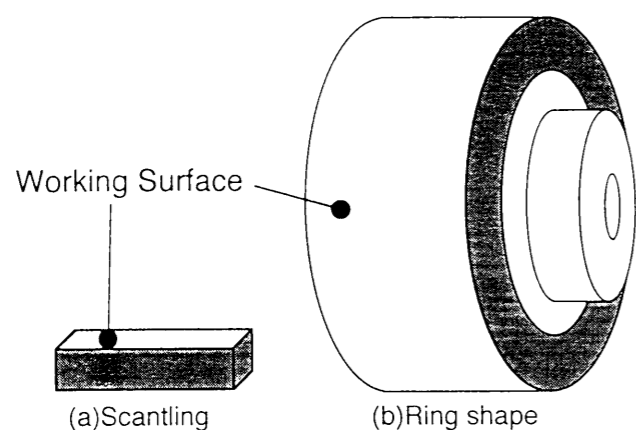


Fig. 2-11 Schematic illustration of SD stones

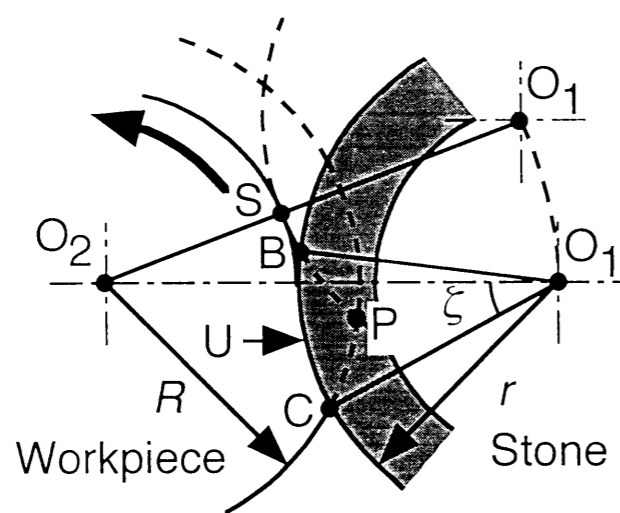


Fig. 2-12 Contact point of stone and workpiece

加工物間に流入しやすくなる。これらが加工性能へ与える影響は大きいと考えられるため、実験結果を評価するうえで重要な要素の1つになるものと思われる。よって、未知数であるリング状砥石における砥石-加工物の接触面積を理論計算と実測との2つの方法で求めることにした。

図2-12のようにリング状砥石で加工物外面を円筒超仕上げする場合を考える。砥石の半径を r 、加工物の半径を R とする。いま、砥石作用面にある任意の1個の切れ刃が \widehat{SP} なる切削溝を生成し、後続の切れ刃が \widehat{BC} なる切削溝を生成するとすれば、 $BUCP$ で囲まれた部分を削り取ることとなる。このとき砥石-加工物間の接触してい

る部分 \widehat{BUC} の長さ l_c を求める。幾何学的関係より²⁾、

$$\overline{O_2C} = \overline{O_1O_2} + \overline{O_1C}^2 - 2\overline{O_1O_2} \cdot \overline{O_1C} \cos \xi \quad (2.35)$$

$\cos \xi \cong 1 - \xi^2/2$ とすると

$$\xi = \sqrt{\frac{2Rt}{r(R+r-t)}} \cong \sqrt{\frac{2Rt}{r(R+r)}} \quad (2.36)$$

ここで t は砥石切込み量である。

また、 $l_c = R \cdot \xi$ より、

$$l_c = \sqrt{2t / \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right)} \quad (2.37)$$

となる。

本研究では、実験条件等より $l_c \cong 8.8 \mu\text{m}$ となる。加工実験中、砥石は振動しながら回転しているので砥石表面に図2-13に示すような加工の跡が残る。そこで実際に接触弧の長さ l_c の測定を試みた。接触弧の長さ l_c を実測してみると $l_c = 0.3 \text{mm}$ となり、理論上の l_c の約34倍となった。このことは砥石および加工物等の弾性的変形により接触長さが増したものと思われる。リング状砥石を用いた場合の接触面積は 6mm^2 で、これは角柱状砥石を用いた場合に比べ非常に小さい。また、リング状砥石を用

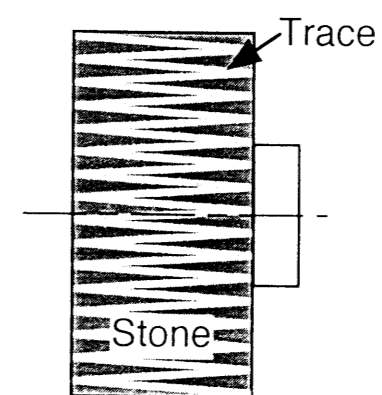


Fig. 2-13 Streak of superfinishing on ring shape stone

いると砥石-加工物間への加工液の供給が容易になり、切りくずの排出能力が向上するものと思われる。

図2-14にリング状砥石で加工を施した加工物表面を示す。角柱状砥石を用いた場合と同様、加工条痕は綺麗に交差しており、従来通りの加工が期待できる。

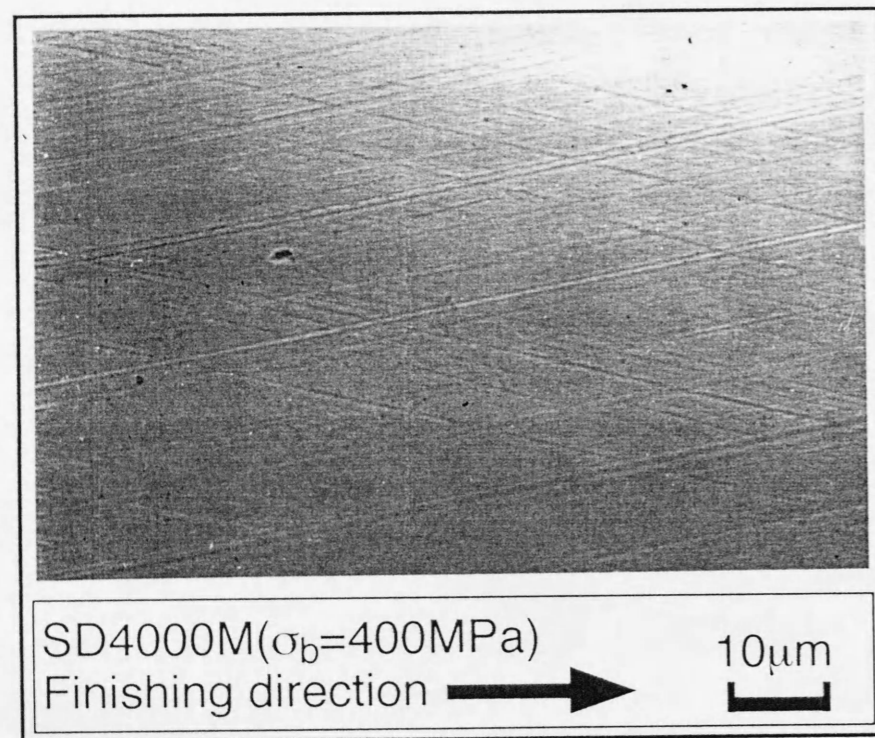


Fig. 2-14 Example of finished surface by ring type stone

2.7 結 言

本章では電解インプロセスドレッシングの基本原理、ファジィ制御および加工条件の過酷さの評価方法について述べた。さらに、リング状砥石を用いた場合の砥石-加工物間の接触状態についても考察を加えた。

電解インプロセスドレッシングは電解作用により、砥石ボンド剤のみを溶出させるため、砥粒保持力の大小がドレッシング効果に影響を受けず、砥粒保持力の大きなメタルボンド砥石のドレッシング方法として有用である。本研究では電解電源として直流パルス電源を用いるため、電気量の調整はオンタイム、オフタイムの設定により容易に行うことができる。そこで電気量の目安としてオンタイムの比率 n_o の定義を行った。また、加工中、電解による砥石-電極間隙の変化が著しいと安定したドレッシング効果が得難い。そこで、ファラデーの法則をもとに導出された電解加工の理論式を応用して電解速度および砥石-電極間隙の変化を理論的に導出を行い、加工時間中の砥石-電極間隙の変化は微小であり、安定したドレッシング効果が期待できることを明らかにした。

ファジィ制御は制御対象を数式表現化する必要が無いため、工具として働く砥粒の複雑な挙動を数式化する必要がなく、砥石を用いた加工を制御するのに適した手法であるといえる。特に超仕上加工のように砥粒切れ刃の状態が切削状態から研磨状態へと変化する加工法の加工状態を制御する方法として有効であると思われる。

超仕上加工では砥粒切れ刃の状態が一定しないため、加工状態を評価するには巨視的に砥石を1個の工具とみなし、加工過程をモデル化して扱う解析手法が有効となる。この解析手法を超仕上加工に適用することにより、加工状態を把握するための評価関数、砥石平均切込み深さ \bar{d} および比加工エネルギー k_s を導出した。 \bar{d} 、 k_s は加工抵抗、加工速度、加工条件で求めることができる。 \bar{d} が大きいとき、砥石の切削性能が良いことを表す。この時、 k_s が小さければなお良い。逆に \bar{d} 小さく、 k_s が大きいとき、砥石の切削性能は悪いと判断できる。

本研究では円筒超仕上に電解インプロセスドレッシングを適用するため、従来の角柱状砥石の代わりにリング状砥石を用いる。リング状砥石を用いることにより砥

石-加工物間が面接触から線接触に近いかたちとなり、加工形態が大きく異なる恐れがある。そこで砥石-加工物間の接触弧の長さを理論的に算出し、実測値との比較を行い考察を加えた。理論値と比較すると装置の剛性、砥石・加工物の弾性変形等の影響から34倍もの接触面積を有する。このため、加工表面に残る加工条痕も角柱状砥石によるものと同様となり、基本的な加工形態に問題はない。また、リング状砥石を用いることにより砥石-加工物間への加工液の供給が容易になり、切りくず排出能力が向上するものと思われる。これらのことは加工性能に大きく影響するものと思われる。

参考文献

- 2-1) H. Ohmori and T. Nakagawa: Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing, Ann. CIRP, Vol.39, No. 1 (1990) 329.
- 2-2) 大森 整, 外山公平, 中川威雄: 鏡面研削されたシリコンウェハ加工変質層の評価, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 989.
- 2-3) 久保田護: メタルボンド超砥粒砥石の電氣的ドレッシング, 砥粒加工学会, Vol.35 No.4, (1991) 15.
- 2-4) H. Ohmori: Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26, No. 4 (1992) 273.
- 2-5) H. Ohmori and I. Takahashi: Efficient Grinding Technique Utilizing Electrolytic In-process Dressing for Precision Machining of Hard Materials, Advancement of Intelligent Production, (1994) 315
- 2-6) H. Ohmori and T. Nakagawa: Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing, Ann. CIRP, Vol.39, No. 1 (1990) 329.
- 2-7) 大森 整, 外山公平, 中川威雄: 鏡面研削されたシリコンウェハ加工変質層の評価, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 989.
- 2-8) 久保田護: メタルボンド超砥粒砥石の電氣的ドレッシング, 砥粒加工学会, Vol.35 No.4, (1991) 15.
- 2-9) H. Ohmori: Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26, No. 4 (1992) 273.
- 2-10) H. Ohmori and I. Takahashi: Efficient Grinding Technique Utilizing Electrolytic In-process Dressing for Precision Machining of Hard Materials, Advancement of Intelligent Production, (1994) 315
- 2-11) 上田隆司, 山本 明: ホーニング機構に関する一考察, 精密機械, 48, 11 (1982) 1514.
- 2-12) T. Ueda and A. Yamamoto: An Analytical Investigation of the Honing Mechanism, ASME, J. Eng. Ind., 106. (1984) 237.
- 2-13) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰: 超仕上の加工機構に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 57, 538 (1991).
- 2-14) 上田隆司, 杉田忠彰: ファインセラミックスの研削・ホーニング・超仕上における被削性の

- 統一的評価, 精密工学会誌, 59, 4 (1993) 680.
- 2-15) 高尾佳宏, 杉山伸人, 薄木雅雄: 電解インプロセスドレス鏡面研削加工について, 不二越技報, Vol. 46 No.1 (1990) 1.
- 2-16) 大森 整: 超精密加工に対応した電解インプロセスドレッシング (ELID) 研削法, 精密工学会誌, 59, 9 (1993) 1451.
- 2-17) 大森 整, 中川威雄: 青銅ボンド砥石の電解ドレッシング, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (1989) 321.
- 2-18) 大森 整: 電解インプロセスドレッシング (ELID) による難加工材の高効率鏡面研削, マシン&ツールジャーナル, 34, 5 (1995) 10.
- 2-19) 高橋一郎, 大森 整, 中川威雄: 直流電源による青銅ボンド砥石の電解ドレッシング効果, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 729.
- 2-20) 佐藤敏一: 電解加工と化学加工, 朝倉書店 (1970) 35.
- 2-21) 日本ファジィ学会編: ファジィ制御, 日刊工業新聞社 (1993) 286, 11.
- 2-22) Y. Tsukamoto: Fuzzy Logic Based on Lukasiewicz Logic and its application to Diagnosis and Control, Doctoral dissertation of Tokyo Institute of Technology, (1979).
- 2-23) 水野雅晴: ファジィ制御に対する改善法 (IV) - 代数積・加算・重心法による場合 -, 第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, (1990) 9.
- 2-24) 前田幹夫, 村上周太: 自己調整ファジィコントローラ, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 2 (1988) 191.
- 2-25) 市橋秀友, 渡辺俊彦: 簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習制御, 日本ファジィ学会誌, Vol. 2, No. 3 (1990) 429.
- 2-26) 野村博義, 林 勲, 若見 昇: デルタルールによるファジィ推論の自動チューニング手法と障害物回避への応用, 日本ファジィ学会誌, Vol. 4, No. 2 (1992) 379.
- 2-27) T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, IEEE Trans. Syst., Man & Cybern., SMC-15, 1 (1985) 116.
- 2-28) E. Mamdani: Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller, Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 8, No. 6, (1976) 669.
- 2-29) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰: 研削加工と砥粒加工, 共立出版 (1984) 33.

第3章 加工表面損傷の曲げ強さへの影響

3.1 緒言

セラミックスを利用しようとするとき、焼結面のまま加工を施さずに用いることが理想であるが、現在の焼結技術では寸法のコントロールに限界があり、何らかの機械加工を施すのが一般的である。一般的にはファインセラミックスを研削で粗加工し、続いてホーニングで加工精度を上げ、必要であれば超仕上げで仕上げ加工を行う加工工程が考えられる。すなわち、研削で加工量をかせぎ、ホーニングや超仕上げで仕上げることになる。このとき、研削ではもちろんであるが、砥石粒度が細かい砥石を用いる超仕上げにおいても、常に切りくずを生成する状態で加工を行う必要がある。切りくずを生成する状態であれば、砥石圧力が大きくなれば切削量が増え、圧力が小さくなれば切削量が減少するという、いわゆる正常な加工状態を保つことができる。ところが、この正常な加工状態が破られると、切削量が砥石圧力に依存しなくなるため形状精度の低下を招くことになる。また、砥石の切れ味も低下してゆき、研削によって作られたき裂などの加工面損傷を除去できなくなり、仕上げ加工を施す意味が大幅に低下してしまう。

これまでの研究結果によれば、正常な加工状態を作り出すためには砥石の設計が重要であり、ダイヤモンド砥石に適切な砥粒保持力を持たせる必要がある^{3-1~3-3}。この点に注意すれば、砥石粒度を細かくしても切りくずを生成する加工状態を保ちながら、鏡面に近い加工面を得ることも可能である。しかしながら、最終仕上げである超仕上げでも切りくずを生成する加工である以上、加工表面に何らかの損傷を与えらるると考えられる。

そこで本章では、超仕上げが加工面に与える損傷の程度について、その曲げ強度を測定することにより調べることにした。このとき、セラミックスは焼結面のまま用いることが一つの理想と考えられることから、焼結面と同等程度の材料強度が得られることを一つの目安と考えることにした。まず、粒度を #500 から #8000 まで変化させた砥石を用いて加工を行い、切りくずを生成する正常な加工状態にあるこ

とを確かめた。次に、加工を施した材料の曲げ強度を測定し、焼結面や研削面をもつ材料と比較することにより超仕上げ加工面におよぼす損傷の程度について検討した。

3.2 加工実験

3.2.1 実験装置および実験条件

本研究では、曲げ試験との関連から角柱状の加工物を円盤状の砥石を用いて平面超仕上げしている。実験装置の模式図を図3-1に示す。円盤状の砥石②はチャック①により主軸に取り付け、回転運動を与える。角柱状の加工物③は加工抵抗測定用の動力計⑤に取り付け、加圧アーム⑥により円盤状の砥石②に一定圧力で押し付けるとともに、振動ユニット⑦によって加振する。加工抵抗は動力計⑤を用いて法線分力 F_n および接線分力 F_t を測定した。なお、振動方向分力は小さく、無視することにした。切削量は加工前後の重量差を天秤で測定した。

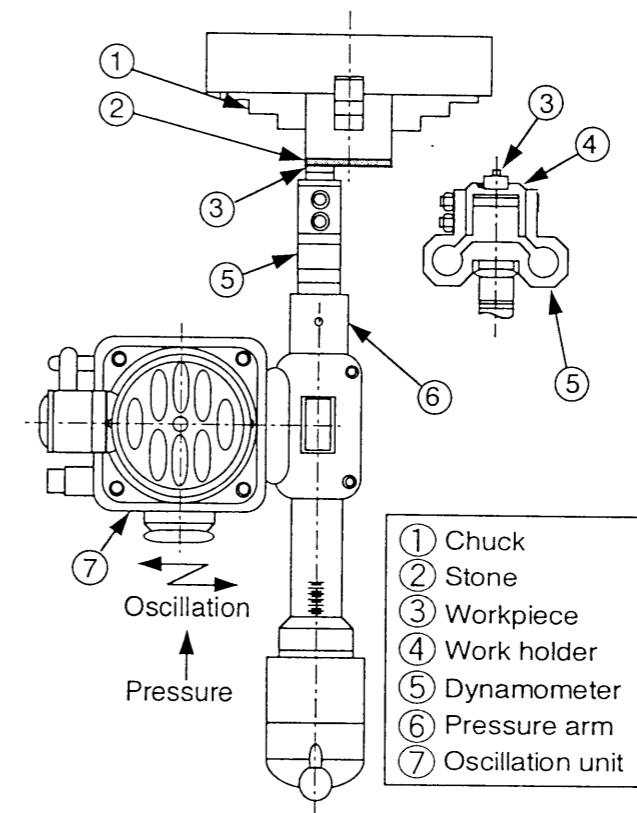


Fig. 3-1 Main part of superfinishing machine

図3-2は加工物と砥石の位置関係を表しているが、砥石の回転運動による条痕が加工物長手方向と垂直になる(a)をVer. (Vertical), 長手方向に平行となる(b)をPar. (Parallel)と呼ぶことにする。

実験条件を表3-1に示す。なお、加工状態を一定とするため、所定の条件で30sの前加工を施した後、加工時間60sの実験を行った。

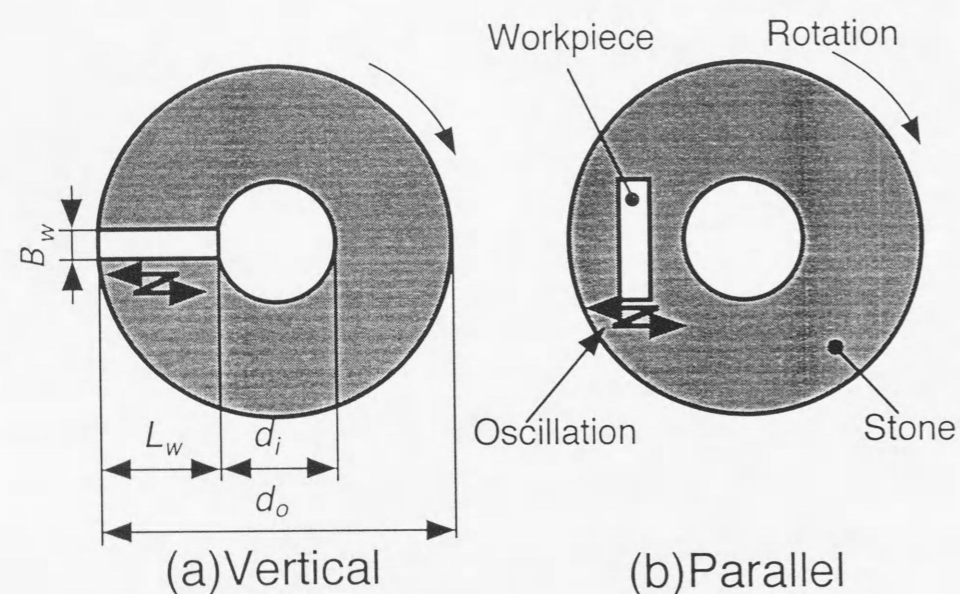


Fig. 3-2 Finishing direction

Table 3-1 Finishing conditions

Finishing speed	V	40 m/min
Frequency	N	900 cpm
Amplitude	a	1.6 mm

3. 2. 2 使用砥石および加工材料

供試材料としてこれまで使用してきた材料の中から切りくずを生成し易いセラミックスを選び出し、常圧焼結したアルミナ、HIP焼結したMn-Znフェライトを用いた。その微細構造が図3-3である。アルミナは径が $5\mu\text{m}$ 程度の粒状の結晶粒から成っているが、フェライトは $25\mu\text{m}$ 程度と大きく、HIP焼結のため密な構造と

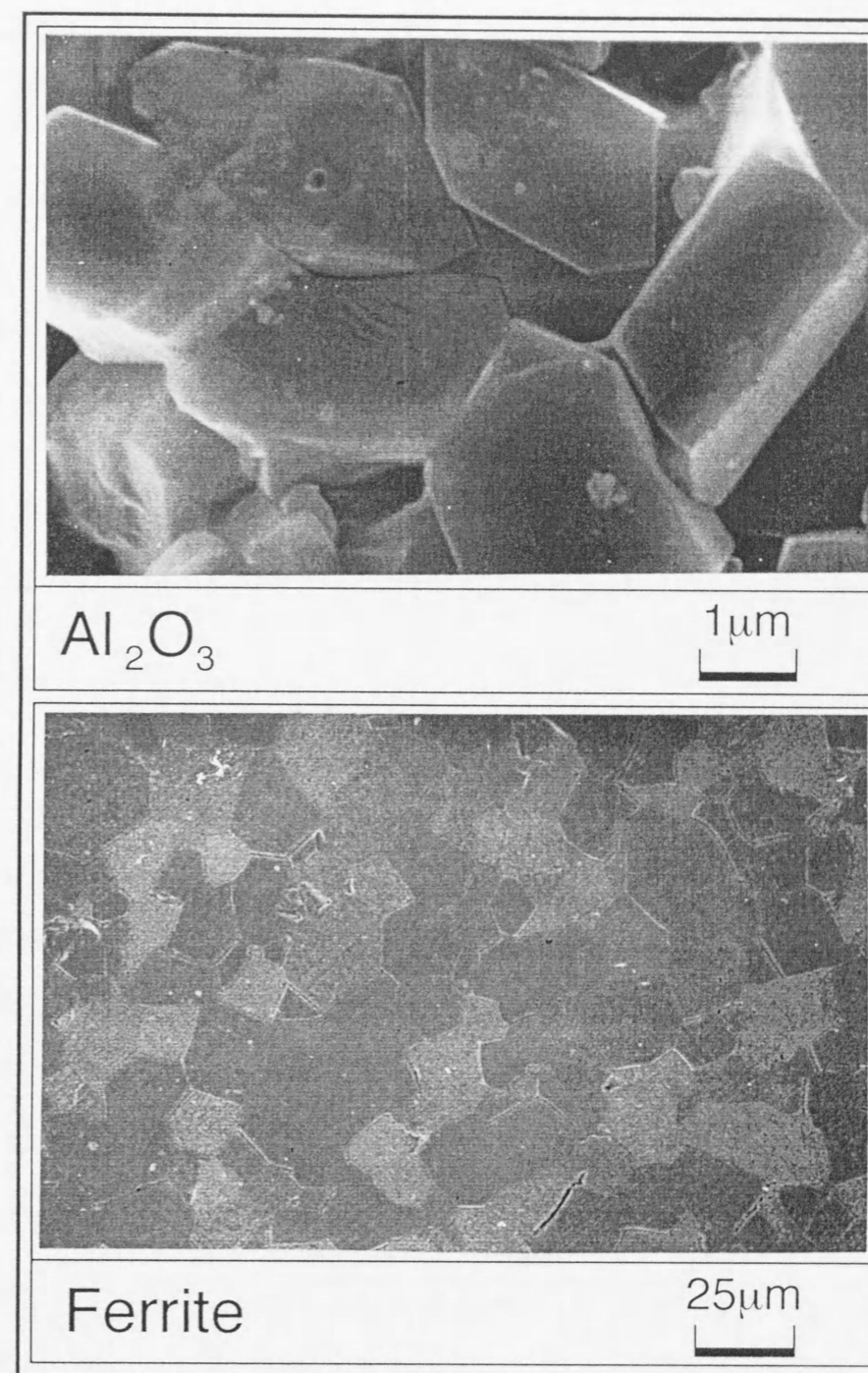


Fig. 3-3 Microstructure of ceramics

なっている。その特性値を表3-2に示す。密度、硬度は測定値であり、他はメーカーの提供である。形状はいずれも長さ $L_w=20\text{mm}$ 、幅 $B_w=3\text{mm}$ 、厚さ $H_w=3\text{mm}$ の角柱状である。

Table 3-2 Characteristics of ceramics

	Al ₂ O ₃	Mn-Zn Ferrite
Density g/cm ³	3.7	5.08
Bending strength MPa	343	157
Fracture toughness K _{IC} MN/m ^{3/2}	3.86	—
Hardness HV	1580	740
Elastic modulus GPa	370	—

Table 3-3 Diamond stone used

Symbol	Bond	Concentration	Bending strength
SD500M	Metal	100	140 MPa
SD1000M	Metal	100	140 MPa
SD2000M	Metal	100	140 MPa
SD4000M	Metal	100	140 MPa
SD8000M	Metal	100	140 MPa

使用した砥石を表 3-3 に示す。実験ではこれまでの研究結果^{3,2)} を基に、砥粒保持力の大きいブロンズ系のメタルボンドを用いた。砥粒にはG.E.製300シリーズミクロンパウダーを用い、#500、#1000、#2000、#4000、#8000の粒度の砥粒を用いた。砥石形状は、外径 $d_o=60\text{mm}$ 、幅 $b=20\text{mm}$ 、内径 $d_i=20\text{mm}$ の円盤である。

加工液には、日本グリース（株）製の加工油（比重：0.84、粘性：3.3cSt（40℃）、添加成分：硫化油脂 7%、油脂 5%、塩素化パラフィン 2%）を用いた。

3. 2. 3 加工形態の確認

材料に加工を施し、曲げ試験によって損傷の程度を調べるわけであるが、切りくずを生成する正常な加工が行われたことを確認する必要がある。一般に、粒度の細かい砥石で加工する場合、砥石の切れ味が失われてしまうことがある。そのとき、砥石は単に加工面をこする状態となり、仕上面粗さは改善されても形状精度の改善は行われず、時にはその低下を招く場合がある。また、研削などの粗加工によってできた加工変質層を十分除去できないことになり、超仕上加工を施す意味が失われてしまう。

そこで、まず加工状態を調べてみた。図 3-4 はアルミナを粒度の異なる砥石で加工した結果であり、砥石切込み深さ \bar{d} 、比加工エネルギー k_s を砥石圧力 P_n で整理した結果である。#1000、#2000 の砥石では、 P_n をあげると \bar{d} は直線的に増加し k_s はほぼ一定値をとっており、安定した加工状態がえられていることが分かる。#4000 砥石になると \bar{d} は P_n とともに大きくなっているが、 k_s も増大しており砥石の切れ味が少し不安定になってきていると判断できる。#8000 砥石になると、 \bar{d} は小さくほとんど加工が行われておらず、 k_s のばらつきも大きくなって砥石は目つぶれ気味となっている。

加工面の SEM 写真を図 3-5 に示す。アルミナをみると、#1000 砥石による加工面では脆性破壊によるき裂型の切りくずが除去されており、脆性破壊が主体の加工が行われているが、#2000 になると塑性変形主体の加工に変化してきていることがわかる。#4000、#8000 砥石になると、砥粒による条痕がわずかに観察される程度であり、特に #8000 では図 3-5 (c) の表面粗さに見るように 32nmRy の面粗さが得られている。一方、フェライトでは #1000 砥石においてもすでに塑性変形主体の加工が行われており、#4000 砥石では 60nmRy の面粗さが得られている。

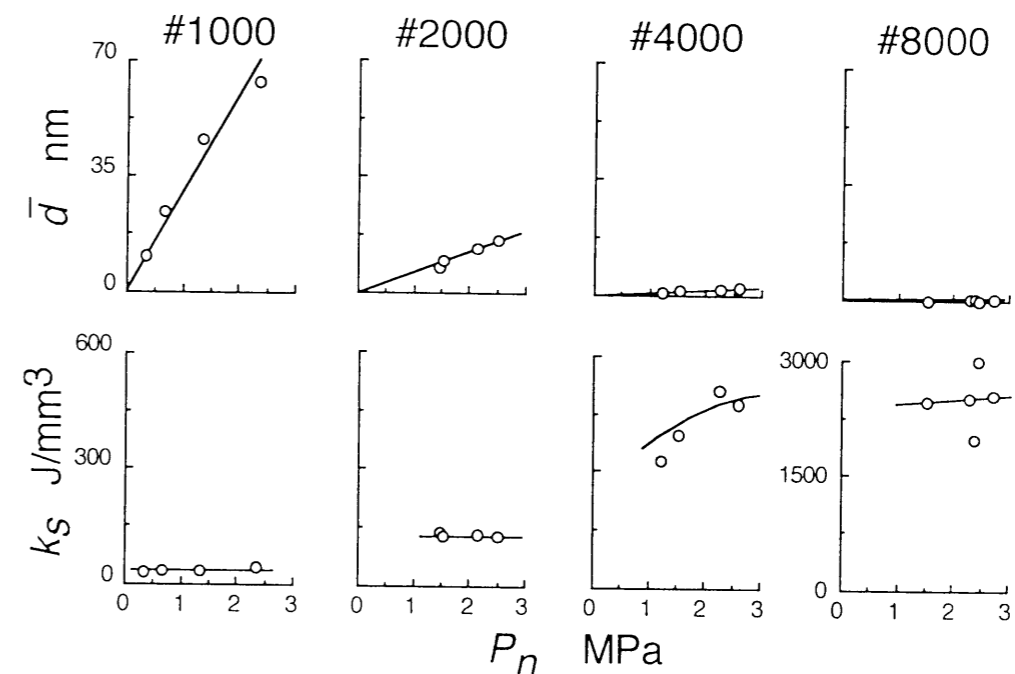
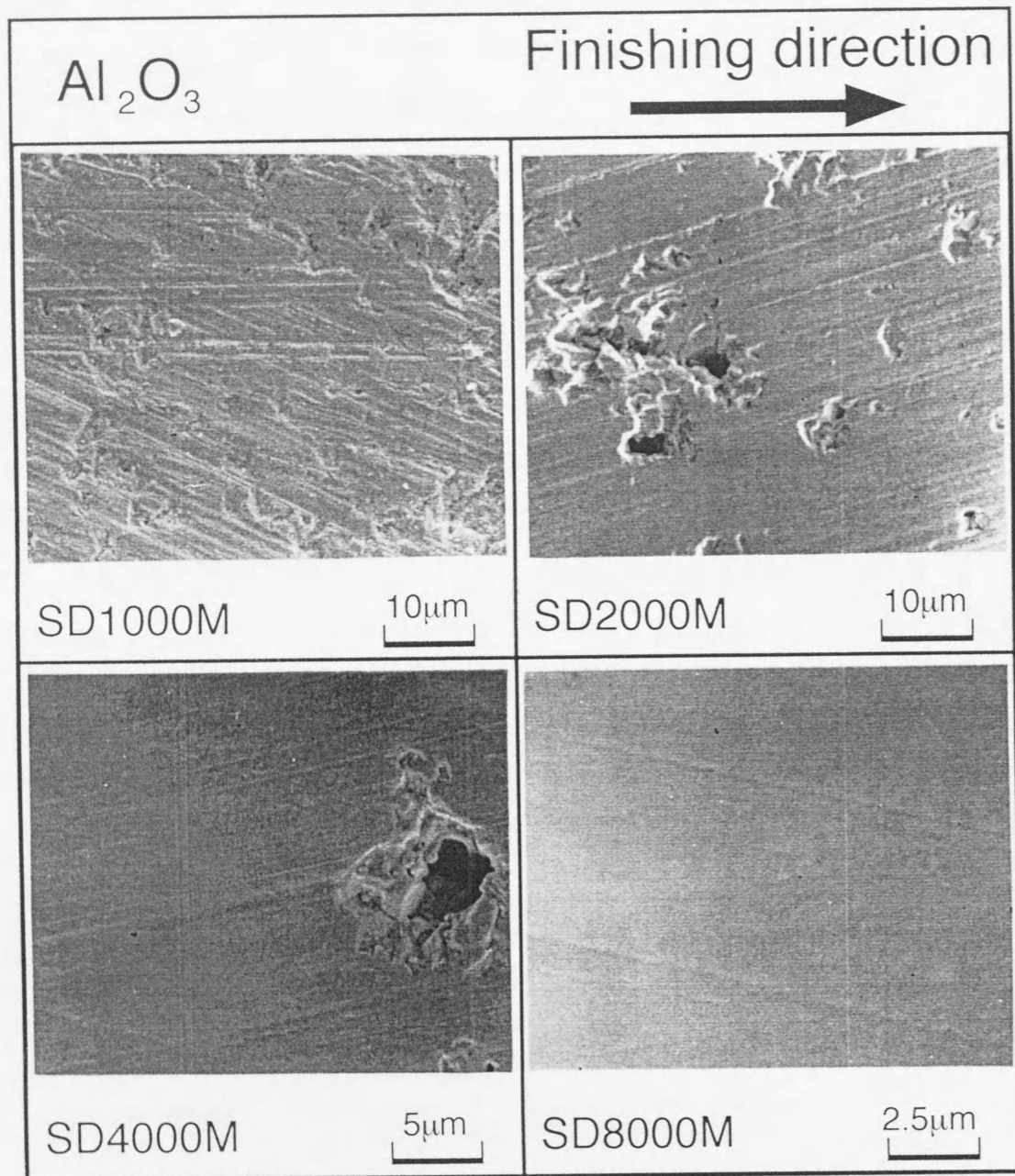
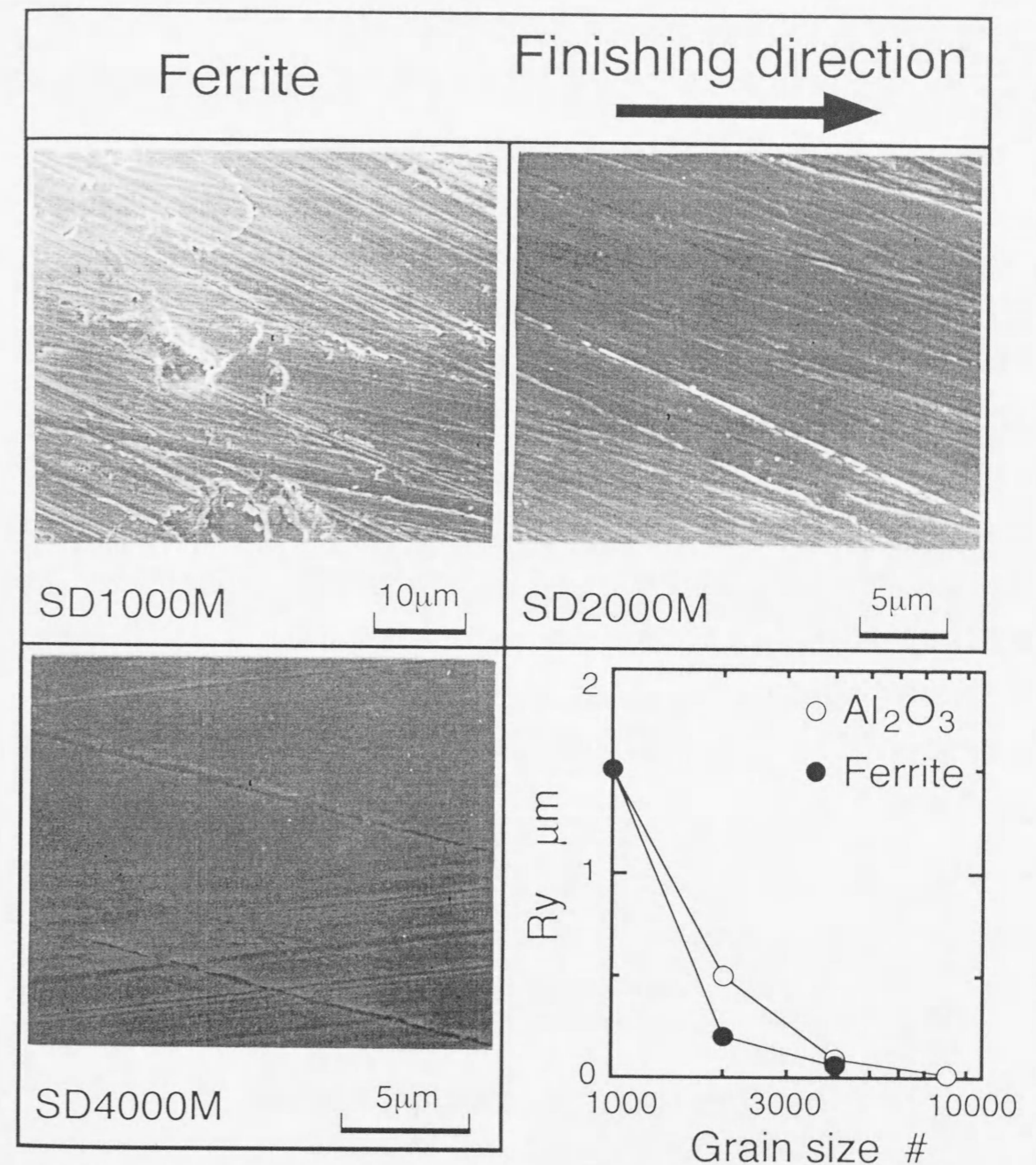


Fig. 3-4 Influence of grain size of finishing performance



(a) Finished surface of alumina ($P_n = 1.8MPa$)

Fig. 3-5 Influence of grain size on finished workpiece



(b) Finished surface of ferrite ($P_n = 0.95MPa$)

(c) Surface roughness of finished workpiece

Fig. 3-5 Influence of grain size on finished workpiece

3. 3 曲げ強さ実験

#8000を除く砥石ではほぼ満足できる加工が行われていることが分かった。そこで、これらの砥石で加工を施した材料の曲げ強さを測定し、加工面の損傷の程度を調べることにした。

3. 3. 1 実験装置および実験条件

曲げ試験は引張り試験機（島津製作所）を用いて4点曲げで行った。上スパンの支点間距離を10mm、下スパンを18mmとし、クロスヘッドのスピードを0.5mm/minとした。試験材料は、表3-1の条件で超仕上げ加工した20×3×3 (mm) のアルミナ、およびフェライトであり、加工を施した面に引張りのモーメントが作用するようにセットした。加工手順は、最も粗い#1000 砥石で60s加工することから始め、#2000 砥石・・・と順に粒度を細かくし、所定の粒度の砥石で60s加工した*。加工面以外の長手3面は#3000のダイヤモンドペーストで研磨し、エッジは面取りして、その影響を排除した。

また比較のため、平面研削を施した加工物の強度も測定した。研削加工条件を表3-4に示す。

Table 3-4 Grinding conditions

Wheel	SD150B
Grinding speed	1500 m/min
Workpiece speed	12 m/min
Depth of cut	10 μm
Grinding fluid	Solution type

*円盤状の砥石を用いているため砥石の内側と外側で加工量に差がでるが、その差は小さい。それでも、加工物の左右を適宜入れ換えることによって片減りを防いでいる。

3. 3. 2 加工方向の影響

加工方向が材料強度に及ぼす影響を調べることによって、強度に及ぼす原因を推定することができる。強度におよぼす主要な要因として、まず加工条痕、および加工条痕直下に形成されるメディアンき裂が考えられる。これらが強度低下の原因になれば、図3-2 (a) Ver. 方向に加工した加工物の強度が低下することになる。一方、砥粒が材料表面に条痕を作る時、砥粒の後方に広がる引張り応力によってコーンき裂の一種と考える微小き裂が発生する場合がある**。このき裂は砥粒の切れ味が低いときに生じ易く、条痕に垂直な方向に入ることから、図3-2 (b) のPar. 方向に加工した加工物の強度が低下することになる。

そこで、#1000 砥石で加工方向を変えて加工したフェライトの曲げ強さを図3-6に示す。Ver. 方向に加工した加工物の平均曲げ強さが98MPaであるのに対し、Par. 方向の曲げ強さが145MPaと50MPa程度も大きくなっていることがわかる。図3-7はアルミナを平面研削し、同様に加工方向の強度への影響を比較しているが、Par. 方

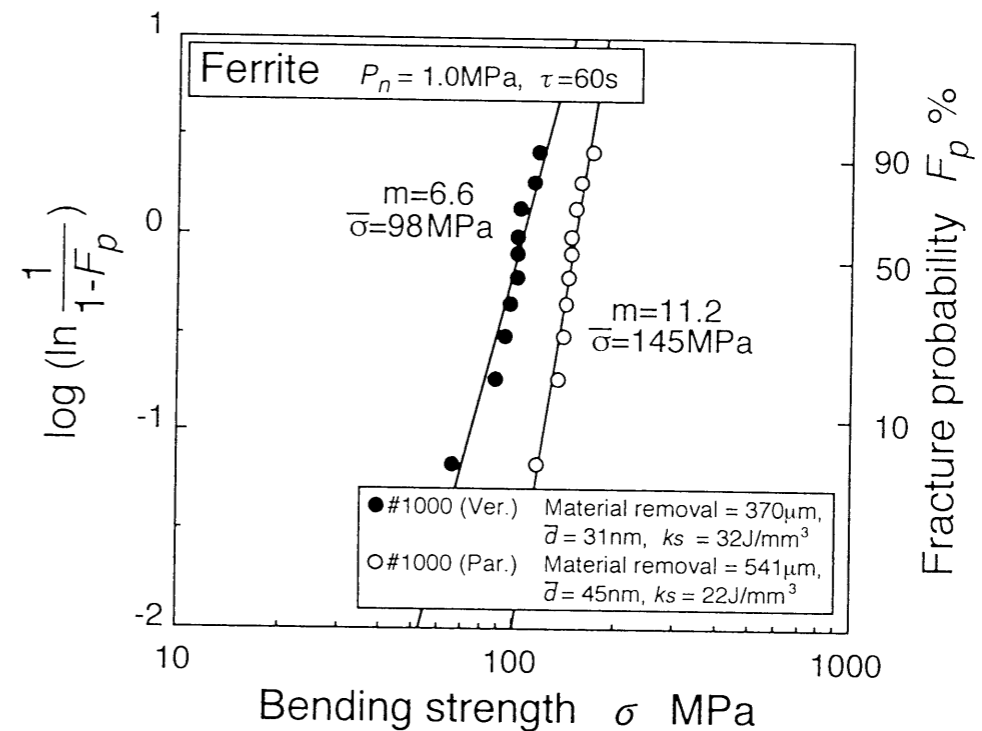


Fig. 3-6 Influence of finishing direction on bending strength of workpiece

**熱応力によるき裂もこの方向に入るが、超仕上げでは熱の影響は小さいと考えられる。

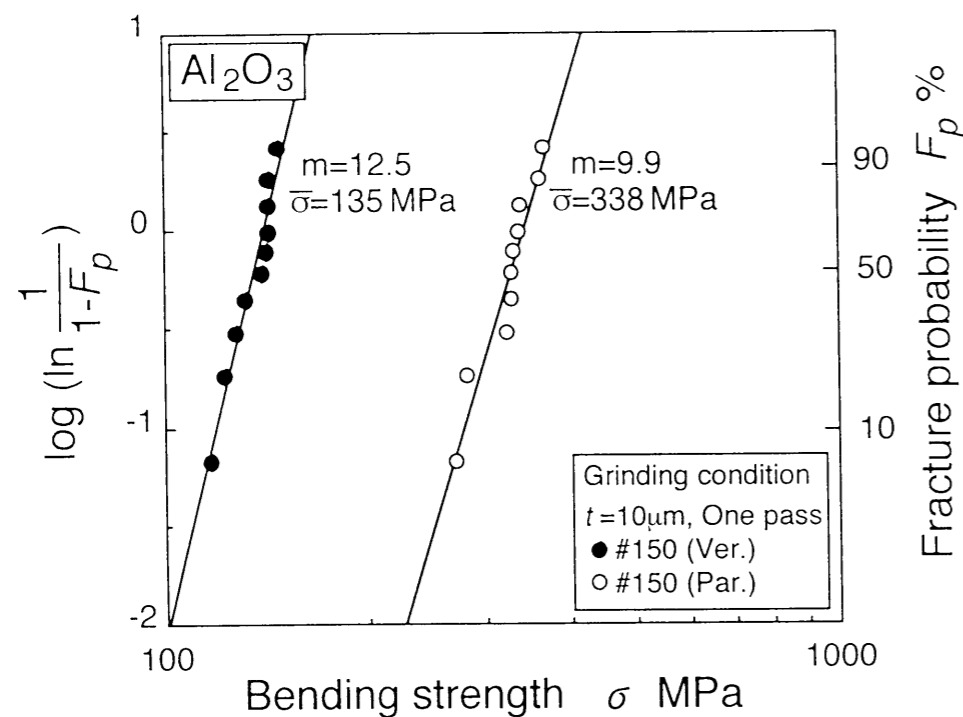


Fig. 3-7 Influence of grinding direction on bending strength of workpiece

向（加工物長手方向に加工）の強度が Ver. 方向（長手に垂直な方向に加工）の強度の2倍以上になっている。したがって、超仕上においても、研削加工同様、砥粒切れ刃によって材料表面に形成される加工条痕、もしくは条痕直下に形成されるメディアンき裂が材料強度に大きな影響を及ぼすと考えられる³⁻⁴⁾。

そこでこれ以後は、加工の影響が大きい Ver. 方向に加工した加工物を研究対象にしていくことにする。

なお、超仕上では砥石が振動しながら加工するため砥粒の加工方向が変化することになり、本研究の場合、最大傾斜角が14.5°であるが、この角度を大きくすれば材料強度に関する加工方向性の影響を緩和することが可能になると考えられる。

3. 3. 3 砥石粒度の影響

アルミナを #1000, #2000, #8000 砥石で最終加工した材料の曲げ強さをワイブル確率紙にプロットした結果が図3-8である。砥石粒度を細かくするほど、材料の曲げ強さは大きくなっている。t検定によれば、これらの強度の間には有意の差

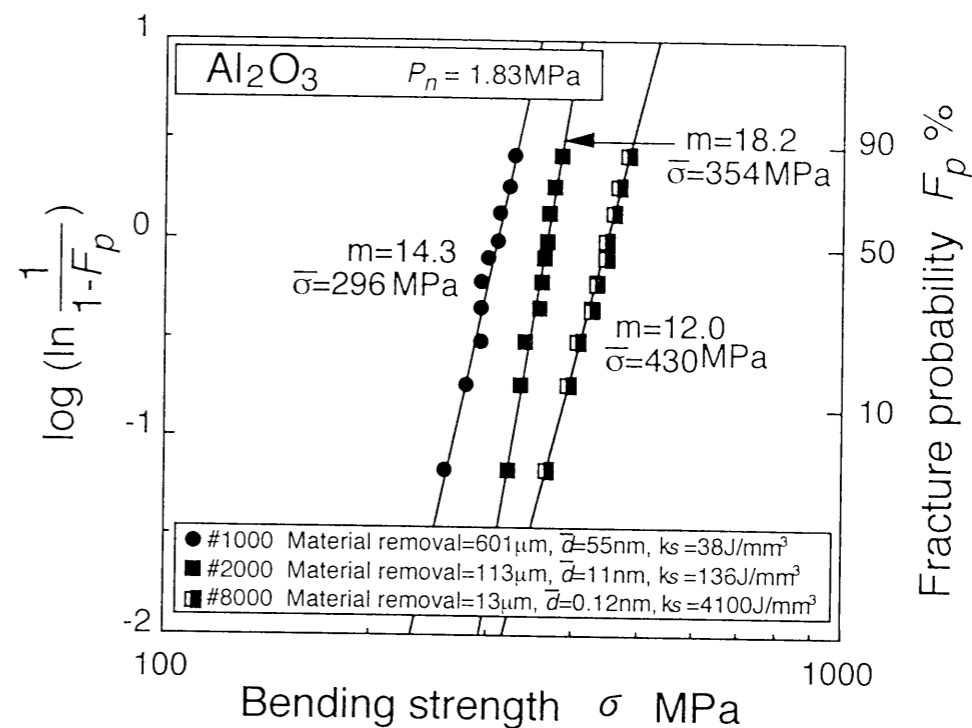


Fig. 3-8 Influence of grain size on bending strength of workpiece

がある。したがって、粒度の高い砥石での超仕上は加工面に与える損傷を小さくできることが分かる。

ところが、#2000 砥石に対して、簡単な線形破壊力学を適用して加工表面に残留していると予測されるき裂長さを求めると10 μm程度となる。この値は最大粗さ Ryが1 μm以下となる加工面粗さに比べるとはるかに大きい。従って、加工条痕の強度への影響は小さく、加工条痕直下に形成されるメディアンき裂が材料の結晶粒の大きさや粒界の状況に依存して強度に大きな影響をおよぼすと考えるのが妥当であろう³⁻⁵⁾。

図3-9は砥石粒度の強度への影響をまとめた結果である。破線は基準と考えるべき焼結表面をもつ材料の強度である。アルミナ、フェライトいずれも #2000～#4000 砥石でほぼ強度が焼結面の強度に飽和する傾向をみせており、#2000 程度の砥石による加工で表面に生じる損傷を小さく抑え得ることが分かる。このとき、図3-5との比較により、加工状態は塑性変形が主体の加工となっている。このため、図3-5(c)より最大粗さ Ryはフェライトで0.2 μm, アルミナでは0.5 μmとすぐれた面粗さが得られており、この程度の粗さに仕上げれば強度的には十分であるこ

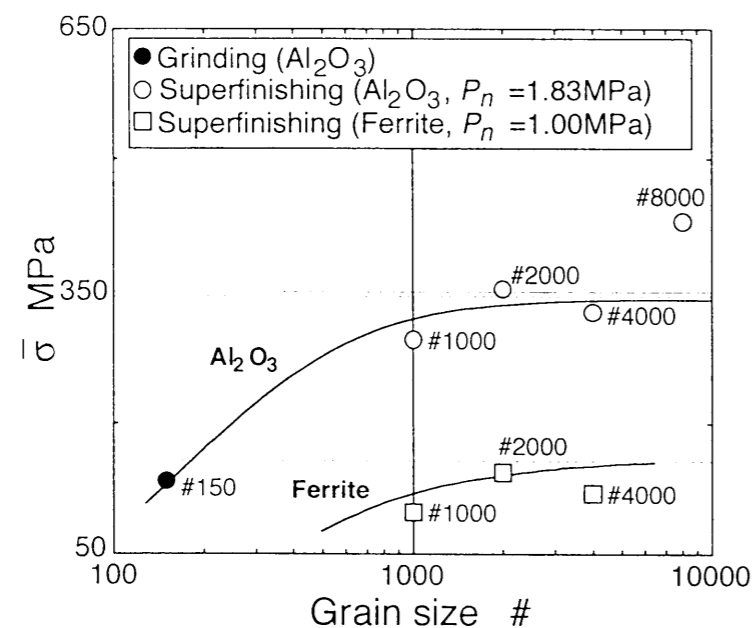


Fig. 3-9 Effect of grain size on improvement of bending strength of workpiece

とが分かる^{3,6)}。一方アルミナでは、#8000 砥石の超仕上げによって大きく強度が向上している。材料本来の強度がはっきりしないため詳細はわからないが、#8000 砥石の加工では砥石は目つぶれ気味であったことを考慮すると、砥石のバニシ作用によって、加工表面に圧縮の残留応力が生じ強度が向上したとも考えられ、今後の検討課題である。

3. 3. 4 研削加工面の改善

加工能率に重点をおいた加工システムを考える時、研削で粗加工を行い、超仕上げで仕上げ加工を行うことになる。すなわち、効率よく寸法精度を出し、研削によるダメージを超仕上げで除去することになる。そこで、超仕上げによる改善の程度を調べてみた結果が図 3-10 である。切り込み $10 \mu\text{m}$ で研削加工したアルミナは 234MPa の曲げ強度をもっているが、この材料に #1000 砥石で 60s の超仕上げを施すことで 332MPa となり、100MPa 程度も強度を回復している。このとき、60s の加工で表面から $500 \mu\text{m}$ を除去しており、研削によるき裂が線形破壊力学から $70 \mu\text{m}$ 程度と推定されることから、単純計算で 10s 程度の加工で完全に除去できることになる。

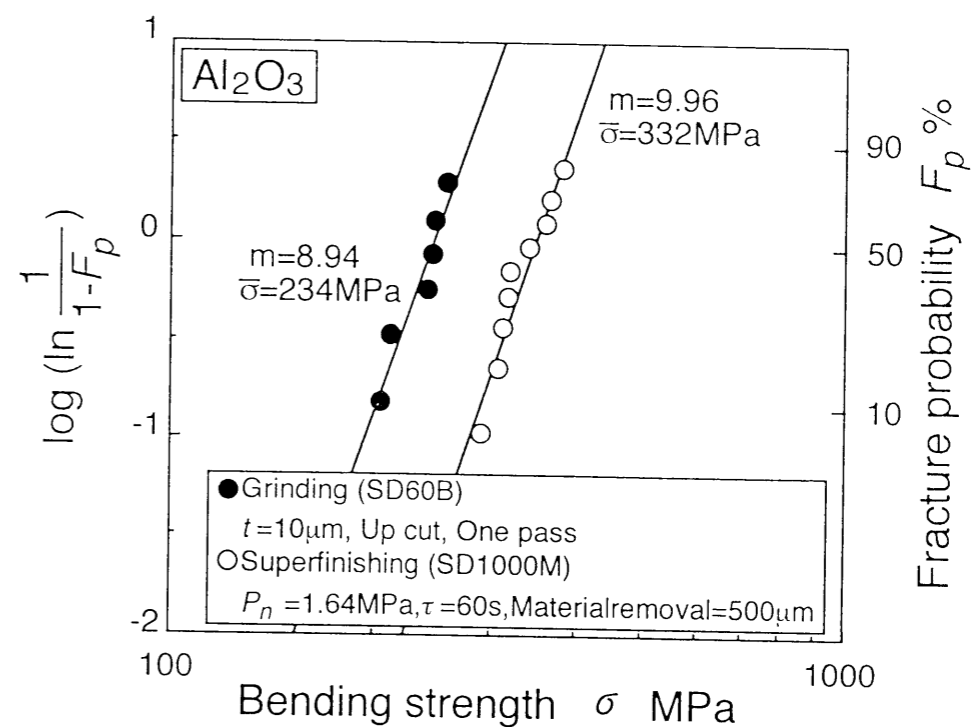


Fig. 3-10 Effect of superfinishing on improvement of bending strength of workpiece

#1000 砥石の後、#2000、#4000 砥石による仕上げを施す時間を考慮しても、ラッピングやポリシングなどの仕上げ加工法に比べると加工時間を大幅に短縮できることになる。

3. 3. 5 破壊力学的考察

これまでの検討から、加工条痕の直下に形成されるメディアンき裂が材料強度の低下の原因になると考えられる。そこでここでは、加工面に生じたメディアンき裂が材料強度を支配すると考えることで、砥粒径が材料強度に及ぼす影響を検討してみる。

球状圧子を破壊靱性 K_c のセラミックスに押し付けた場合を考えると、圧子半径が遷移圧子半径より小さい場合、荷重 f を大きくしていくと弾塑性境界領域からメディアンき裂が生じ、その深さ C_m は^{3,1)}

$$C_m \propto \left(\frac{f}{K} \right)^{2/3} \quad (3-1)$$

で与えられる.

ところが, 表面に長さ C_m のき裂をもつ材料に均一な単純引張応力がき裂を開口する方向に作用した場合, その材料の破壊強度を σ_F とすると,

$$\sigma_F \propto \frac{K_{IC}}{C_m^{1/2}} \quad (3-2)$$

この2式より

$$\sigma_F \propto K_{IC} \frac{1}{(f/K_c)^{1/3}} \propto \frac{K_{IC} K_c^{-1/3}}{f^{1/3}} \quad (3-3)$$

一方, 砥粒平均径 d_g , 集中度が C_g の砥石に押し付け力 F_n を加えた場合を考えると, 砥粒1個に作用する押し付け力 f_n は

$$f_n \propto \frac{F_n d_g^2}{C_g} \quad (3-4)$$

そこで, $f=f_n$ とおくと, 式 (3-3), (3-4) より

$$\sigma_F \propto C_g^{1/3} K_{IC} K_c^{1/3} F_n^{-1/3} d_g^{-2/3} \quad (3-5)$$

となる. 式 (3-5) より, σ_F を大きくするためには, 砥粒径 d_g が小さい砥石を用いること, 砥石押し付け力を小さくすることが有効であり, その効果は砥粒径を小さくする方が大きいことがわかる. すなわち, 粒度の細かい砥石を用いれば, 砥石圧力の強度への影響を抑えて, 加工面に与える損傷を抑制した加工を行うことができるといえる.

3. 4 結 言

本章では超仕上加工も切りくずを生成する加工である以上, 加工表面に何らかの損傷を与えるものと考えられる. そこで, アルミナ, フェライトに #500~#8000 の砥石で超仕上を施し, その曲げ強さを測定することにより超仕上加工が仕上面に与える損傷の程度について調べた. さらに, 破壊力学的立場からも考察を加えた. 得られた主な結果は次の通りである.

- (1) #4000までの砥石では切りくずを生成する正常な加工を施すことができたが, #8000では目づまり気味の加工となった.
- (2) #2000程度の砥石で仕上げることにより, 短時間で効率的に, 面粗さを $0.2 \sim 0.5 \mu\text{mRy}$ 程度に改善することができ, 材料の曲げ強度も焼結面の強度に回復できる.
- (3) #8000砥石で仕上げた材料は, 焼結面以上の強度を持つようになるが, この原因は加工表面の圧縮応力の影響が考えられる.
- (4) 超仕上で仕上げた材料でもその強度は加工方向に依存し, 加工条痕を開口する方向の曲げモーメントに対して小さくなることから, 加工表面に現れない損傷の影響を考えなければならない.
- (5) 加工表面に与えるダメージを抑えるためには, 粒度の細かい砥石を用いること, 砥石圧力を下げることが有効であり, その効果は粒度を細かくする方が大きいと考えられる.

参考文献

- 3-1) 上田隆司, 花見真司, 裏 匡史, 山本 明: ファインセラミックスのホーニング加工, 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 1138.
- 3-2) 上田隆司, 金曾久佳, 松森 昇, 杉田忠彰: ファインセラミックスの超仕上加工, 精密工学会誌, 57, 7 (1991) 1229.
- 3-3) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰: 超仕上の加工機構に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 57, 538 (1991) 2154.
- 3-4) 張 壁, 戸倉和, 吉川昌範: ダイヤモンド砥石によるセラミックス研削面の表面性状, 精密工学会誌, 54, 8 (1988) 1537.

- 3-5) 田中芳雄：セラミックスの機械的性質と被加工性，ニューセラミックス，5 (1988) 37.
3-6) 萱場信雄，藤沢政泰：セラミックスの高効率研削—クラック層深さへの影響—，精密工学会春期大会学術講演会論文集 (1986) 355.

第4章 電解インプロセスドレッシングの適用

4.1 緒言

前章の結果より砥石の粒度を細かくすることにより加工表面へ与えるダメージを軽減できる事がわかった。しかし砥石の粒度を細かくしていくと切りくずの排出が難しくなり，砥石が目づまりを生じやすくなる。目づまりを生じると砥石の切れ味は格段に低下してしまう。本章では目づまりによる切れ味の低下を電解インプロセスドレッシングを行うことにより適度に自生作用を促進して，砥石の切削性を維持する方法を検討する。また，電解ドレッシングを行うため，従来用いられてきた油性加工液の代わりに水溶性加工液の使用を試みる。現在，超仕上加工では切りくず排出効果，潤滑効果ともに優れた油性加工液が用いられているが¹⁾，研削など他の加工法では水溶性研削液を用いる場合が多く，その中で油性加工液を用いる超仕上加工は加工ラインを組む上で大きな障害となっている。すなわち，水溶性加工液の洗浄・乾燥を行った後，超仕上を行わなければならない，加工後再び油性加工液の洗浄・脱脂が必要となる場合もある。また，油性加工液の廃液処理も難しい。従って，超仕上に水溶性加工液を用いることができれば洗浄などの工程を省くこともでき効率的である。また，加工液を一種類に統一することも可能となり，その管理を極めて単純化できるなどメリットは大きい。

電解ドレッシングの併用により，砥石ボンド剤を強制的に除去し，砥石の切りくず排出能力および切削性を維持できることが期待できる。

4.2 加工実験

4.2.1 実験装置および実験条件

実験装置の主要部を図4-1に，砥石形状および電極の設定位置を図4-2に示す。実験には円盤状砥石を用い，加振した角柱状の加工物を一定圧力で押し付けて仕上げる平面超仕上で行った。円盤状砥石②は旋盤のチャック①に固定し，回転運動を与えると同時に，ブラシを介して直流パルス電源⑨の陽極に接続する。一方，電極

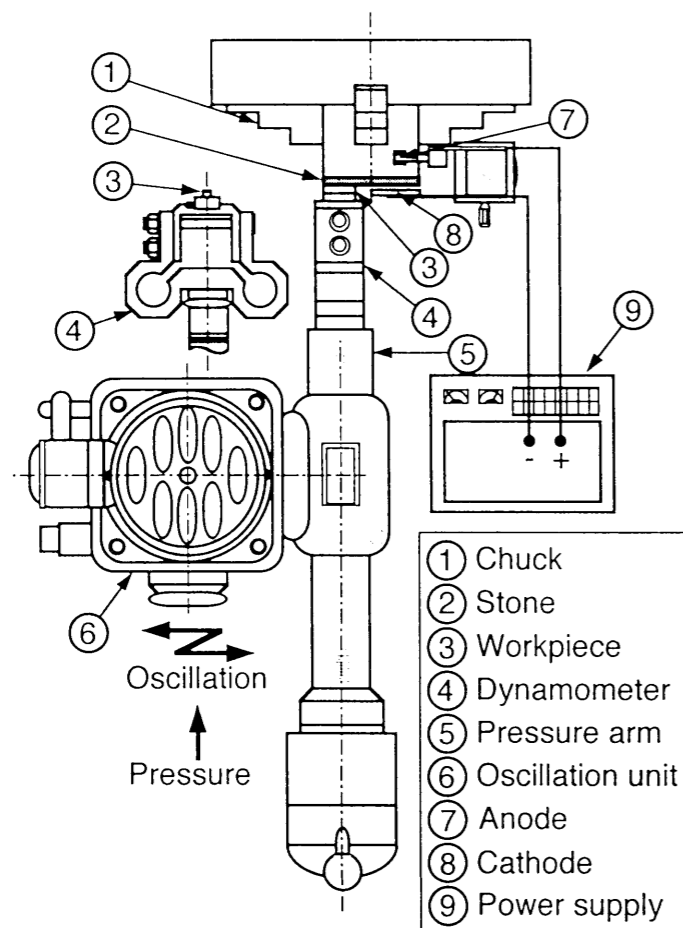


Fig. 4-1 Schematic illustration of main part of superfinishing machine

は図4-2にみるように砥石作業面と一定のギャップ（設定ギャップ y_0 ）を介して電源の陰極に接続している。ギャップ間を加工液が流れるとき電流が流れ、メタルボンドの電解が行われる。電極の大きさおよびギャップは流れる電流に大きな影響を与える。電極が大きくなり、ギャップが狭くなると効果的なドレッシングが期待できるが、加工液が流れ難くなる等、実験装置の面から限界があり適当な大きさやギャップがある。そこで、本研究では種々の条件で検討し、電極面積を砥石作業面積の1/20、ギャップ $y_0=0.5\sim 1.0\text{mm}$ とした。

加工物③は加工抵抗測定用の動力計④に取り付け、加圧アーム⑤中のスプリングによって一定圧力で砥石に押し付けるとともに、旋盤の刃物台に取り付けた振動ユニット⑥によって加振した。

電解用直流パルス電源⑨は図4-3に示すようなパルス状の電圧を印加することができる。図に示すように電源パルスのオンタイム、オフタイムを定め、1サイクル

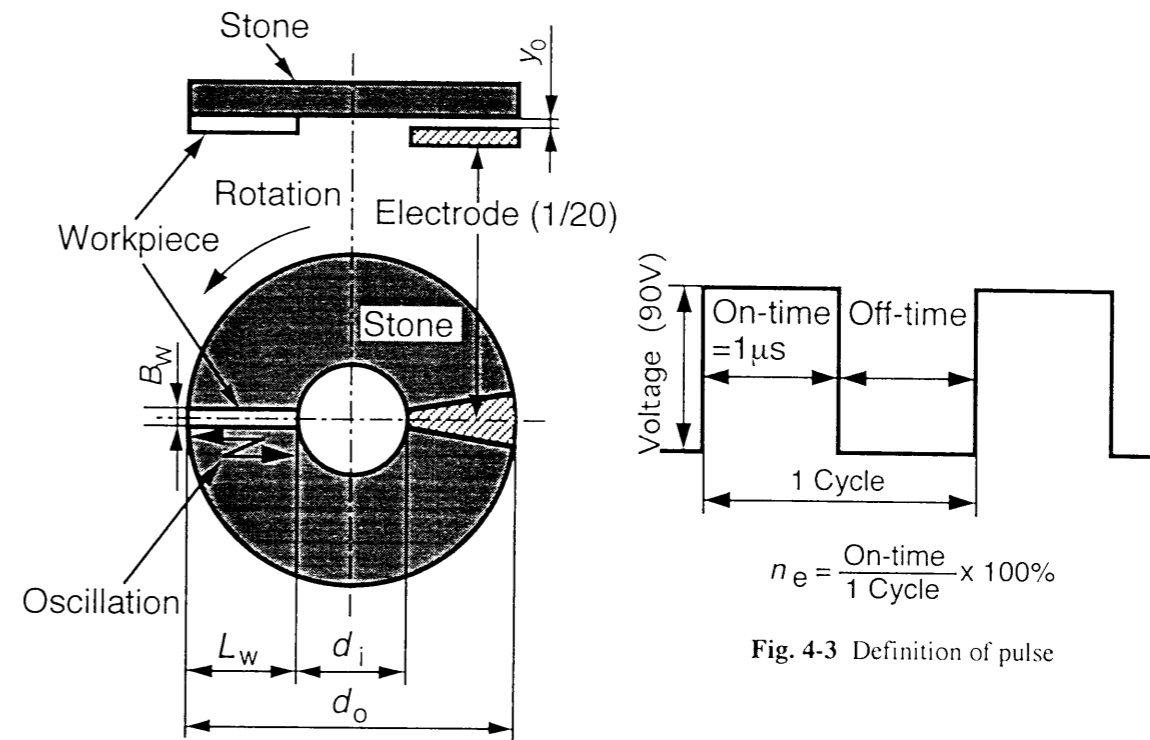


Fig. 4-2 Experimental set-up

の中でオンタイムの占める比率 n_e を変化させることで電気量を調整し、電解ドレッシングの速度を制御している。オンタイム、オフタイムは各々最短で $1\mu\text{s}$ 、最長で $100\mu\text{s}$ まで設定可能である。種々の組合せが可能であるが、実験はオンタイム $=1\mu\text{s}$ と一定とし、オフタイムを変化させることにより電気量を調整した。また、印加電圧は 90V とした。

主な実験条件を表4-1に示す。加工速度 $V=34\text{m/min}$ 、振動数 $N=907\text{cpm}$ と標準的な加工条件を採用しており、加工液は液温を $T_c=298\text{K}$ (25°C)と一定にし、毎分 2l 供給した。また、砥石は、加工始めの状態を一定とするためスティック砥石(GC320)によりドレッシングして用いた。

Table 4-1 Finishing conditions

Finishing speed	V	(m/min)	34
Frequency	N	(cpm)	907
Amplitude	a	(mm)	1.6
Coolant temperature	T_c	(K)	298
Initial electrode gap	y_0	for Soft steel (mm)	0.5
		for Al_2O_3 (mm)	1.0

4. 2. 2 加工液

実験に使用した加工液の特性値を表 4-2 に示す。A_c、B_c、C_c、D_c は水溶性加工液であり、E_c は鉱油をベースにした油性加工液である*。A_c は極圧剤を添加したソリュブルタイプ研削液であり潤滑性、浸透性、防錆性に優れている。B_c は極圧剤を加えていないソリュションタイプの研削液であり、その分A_c よりも反応性が低い。C_c はB_c から脂肪酸などの油性向上剤を除去して単純化（反応性を抑えた）したソリュションタイプの研削液である。D_c は界面活性剤を多量に加えて浸透性を向上させたソリュブルタイプの研削液である。いずれの加工液も特別に導電性物質

Table 4-2 Characteristics of coolants

Symbol of coolants		A _c	B _c	C _c	D _c	E _c
Coolant type JIS		W2-2	-	-	W2-1	-
Fatty acid•its derivative	mass %	22	7	-	11	-
Alkanolamine	mass %	15	30	30	13	-
Refined mineral oil	mass %	5	-	-	-	85
Surface active agent	mass %	-	-	-	30	-
Rust inhibitor	mass %	10	-	30	15	-
Others	mass %	5.9	0.4	1.3	0.5	15
Water	mass %	42.1	62.6	38.7	31.5	-
Sulfur	mass %	-	-	-	-	0.7
Chlorine	mass %	2.5	-	-	-	1.2
Fatty oil	mass %	-	-	-	-	12
pH (X30)		9.4	9.4	9.8	8.7	-
Surface tension (X30, 10 ⁻³ N/m)		38	68.2	72	35.5	-

* 使用した加工液は日本グリース（株）製、A_c：サンライト EC-40、B_c：サンクール GF-100、C_c：サンクール GF-200、D_c：サンライト TC-800、E_c：No.7 である。

は加えていない。E_c は一般に超仕上に使用されている油性加工液であり、水溶性加工液の性能と比較するために用いている。

電解ドレッシングを行うにあたって加工液の抵抗率は電解作用の強弱を支配する大きな要素の1つである。そこで水溶性加工液を100%（原液）～1%に希釈し、抵抗率を測定した。加工時には多量の加工液を用いることから、希釈液としてできるだけ水道水を用いることが望ましい。

図 4-4 に実験に用いた簡易抵抗率測定装置の模式図を示す。実験に用いた電導度槽は2重構造となっており、内側の槽には測定する加工液を入れ、外側の槽には液温制御用の冷却水を入れる。内槽-外槽間は完全に絶縁を施してあり、内槽-外槽間で並列回路を形成することはない。また、電極の溶出および電解生成物の付着を極力抑えるために電極材料にはφ8の黒鉛円柱を用いる。供給電源は商用交流100Vをスライダックで降圧したものを扱い、その時の電圧値、電流値をデジタルマルチメータで測定し、抵抗率を求める。通電に伴う加工液の温度上昇は常時温度計により監視し25℃一定に保ち実験を行う。

図 4-5 に水道水を希釈液として得られた電圧と電流との関係を、表 4-3 に得られ

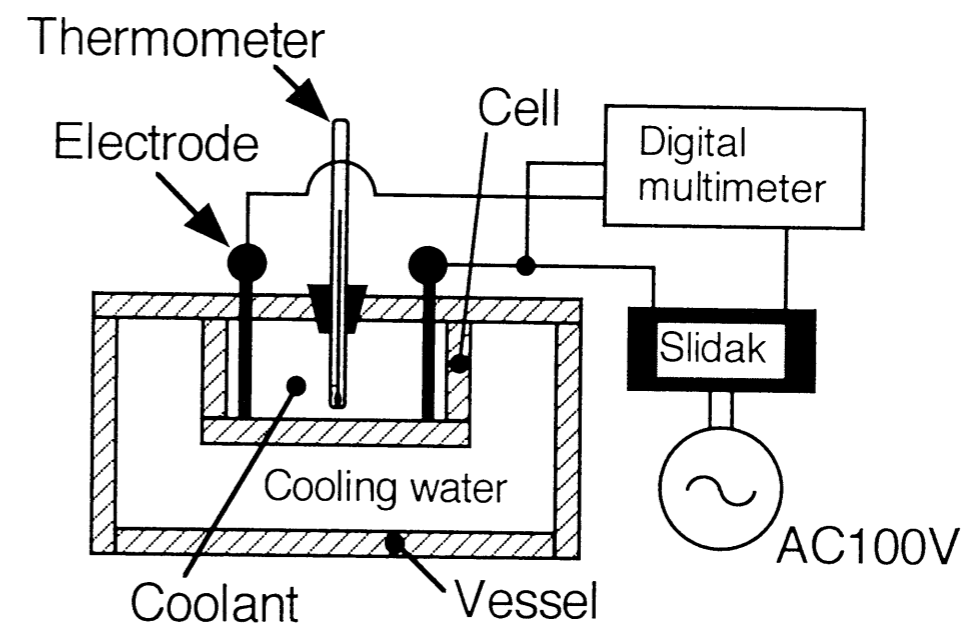


Fig. 4-4 Equipment to measure coolant resistivity

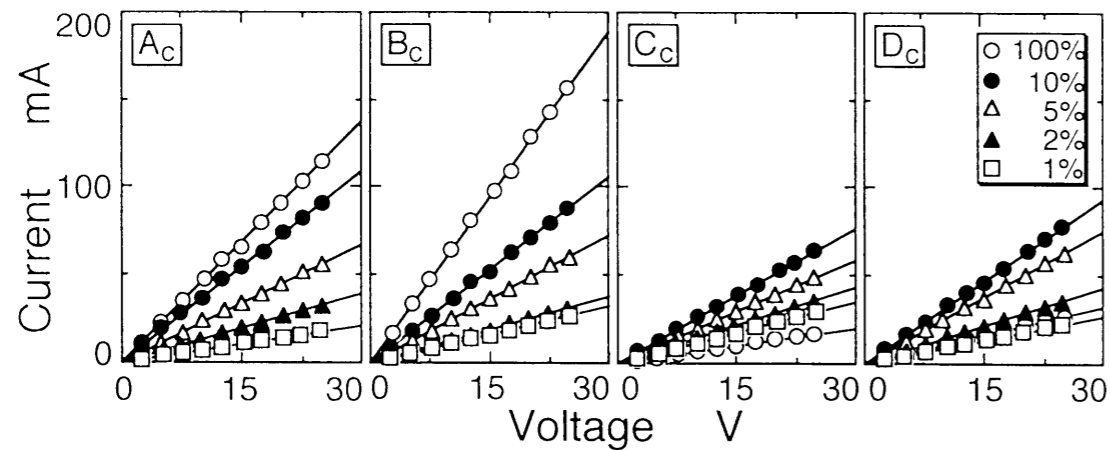


Fig. 4-5 Relation between current and voltage

Table 4-3 Values of resistivity

Symbol of coolants	A _C	B _C	C _C	D _C [Ω cm]
100% dilution	198	142	1308	812
10% dilution	245 (360*)	253 (-)	351 (500*)	285 (390*)
5% dilution	394 (400*)	368 (-)	458 (-)	359 (480*)
3.3% dilution	- (634)	- (168)	- (1024)	- (-)
2% dilution	691 (1085)	718 (1056)	633 (1573)	635 (-)
1% dilution	1285 (-)	856 (-)	786 (-)	979 (-)

た各加工液の抵抗率を示す。括弧内は希釈液に蒸留水を用いた場合で、星印はメーカ提供である。一般に電解ドレッシングに用いられる加工液の抵抗率は2%の溶液で2000~4000 Ω cm程度であり^{1,2)}、これに比較すると本研究で用いた加工液の抵抗率は低い。また、蒸留水に比べ、水道水を用いると30~50%程抵抗率が低くなっている。そのため過度な電解作用による砥石の形崩れ、陰極および砥石表面への電解生成物の付着、過度な砥粒の脱落等を防ぐため弱い電解条件の設定が必要と予想される。

4. 2. 3 使用砥石および加工材料

実験にはブロンズ系メタルボンド砥石を用いた。表4-4に砥石の仕様を示す。表中の曲げ強度はボンドの砥粒保持力の大小の目安となり、強度が大きいほど保持力

Table 4-4 Diamond stones used

Stone	SD1000 M	SD4000 M-S	SD4000 M-H	SD8000 M
Grain type	SD	SD	SD	SD
Bond	Bronze metal	Bronze metal	Bronze metal	Bronze metal
Grain size (#)	1000	4000	4000	8000
Concentration	100	100	100	100
Bending strength (MPa)	140	140	200	200

Table 4-5 Characteristics of workpieces

	Soft steel	Al ₂ O ₃
Density (g/mm ³)	7.79	3.7
Vickers hardness (HV)	126	1580

が大きい^{4,3)}。実験に使用した砥石の曲げ強度 σ_b は140MPaおよび200MPaであり、砥粒保持力は強い。砥粒には人造ダイヤモンド(GE製300シリーズミクロンパウダ)を用いている。砥石の粒度は $\#1000$ 、 $\#4000$ 、 $\#8000$ の3種類である。

砥石形状は図4-2に示すようであり、外径 $d_o=60$ mm、内径 $d_i=20$ mmの円盤状である。角柱状砥石を用いる円筒超仕上に比べ陰極の配置が容易な形状としている。

加工材料にはセラミックスとして常圧焼結したアルミナ、金属材料として軟鋼(S15C相当)を用いている。表4-5に加工物の特性値を示す。加工材料は20mm×3mm×3mmの角柱状とし、 $\#400$ 砥石により所定の前加工を施している。

4. 3 電解ドレッシング速度の検討

電解インプロセスドレッシングを施すことにより、砥石作業面は後退し、電極とのギャップが変化する。ギャップが変化すると、電解強度が変化するため安定したドレッシングを継続して行うことが困難となる。そこでファラデーの法則をもとに導出された電解加工の理論式^{4,7)}を応用して電解速度 v_f およびギャップ y の時間的変化を求めると、(付録B参照)

$$v_i = \frac{s}{y} \quad (4-1)$$

$$y = (y_0^2 + 2s\tau_d)^{1/2} \quad (4-2)$$

ここで y_0 は設定ギャップ, τ_d は電解時間, s は次式で与えられる.

$$s = \eta \frac{(\kappa_0(1 + \Delta T_c \alpha)(1 - \beta)^{3/2})n_e E S_r (1 + G_d \gamma_g^{-1})}{F \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \quad (4-3)$$

ただし, κ_0 : 加工液の導電率, ΔT_c : 極間通過時の加工液温度差, α : 加工液の温度係数, β : 気泡率, E : 電圧降下, S_r : 電極と砥石の面積比, G_d : 単位体積砥石中の砥粒重量, γ_g : 砥粒密度, n_e : オンタイムの比率, F : ファラデー定数, y : ギャップ, n_i : ボンド剤の原子価, M_i : 原子量, c_i : 元素の含有率, γ_i : 元素の密度, η : 電流効率, i : ボンド剤中の元素数 ($i=1 \sim n$).

導出した式 (4-1), (4-2) に表 4-3 に示す加工液の抵抗率, および砥石の諸条件を代入し, 計算した結果のうち加工液 C_c を用いた場合を図 4-6 に示す. 電解時間が 1000s あたりからギャップ y が変化し始め, ドレッシング速度 v_i が低下している. 本研究での加工時間は最長で 900s 間であり, 加工時間中の y の変化は小さく v_i はほぼ一定と考えることができる. たとえば, $n_e=6.25\%$ で 900s 間連続で電解した場合の砥石面後退量は $12.2 \mu\text{m}$ 程度であり, 設定したギャップ $y_0=1.0\text{mm}$ に比較すると無視し得る値である. 従って, 電解に伴う砥石損耗による電解速度の変化に注意する必要のないことがわかる.

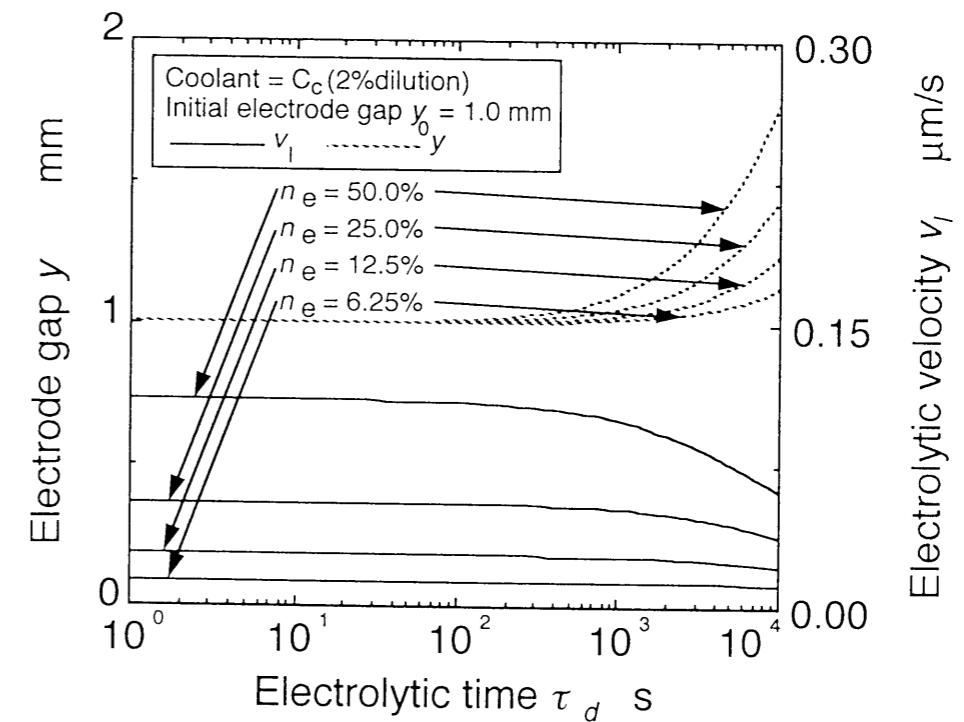


Fig. 4-6 Relation between electrode gap and electrolytic time

4. 4 実験結果

4. 4. 1 電解条件の影響

実験では図4-3に示すように、オンタイム=1 μ sとし、オフタイムの時間を変化させて比率 n_e を変えている。図4-7は加工物にアルミナ、砥石にSD4000M ($\sigma_b=200$ MPa)、加工液に C_c の2%溶液を用い、ギャップ $y_0=1.0$ mmとして n_e を変化させた場合の結果である。オンタイムの増加とともにドレッシング効果が得られ \bar{d} が大きくなり、 k_s が減少して砥石の切削性は向上する、しかし、 $n_e \approx 7.7\%$ (オンタイム=1 μ s, オフタイム=12 μ s) でピークをとり、以後比率 n_e を増すと \bar{d} が小さくなり、 k_s が大きくなって砥石の切削性は低下している。これは過度の電解作用により砥粒保持力が低下し、砥粒脱落が著しくなったためである。なお、オンタイムを変化させて加工を行ってみたが、比率 n_e が同じであればほぼ同様の結果が得られた。

そこで、以後のアルミナの加工では $n_e=7.7\%$ の条件で加工してゆくことにする。

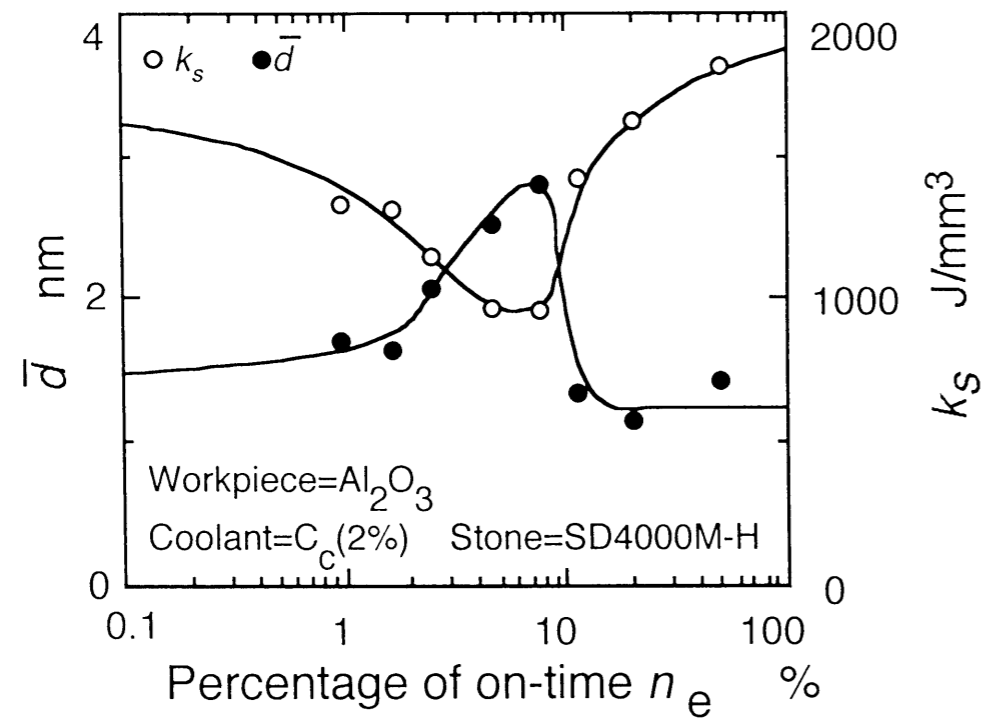


Fig. 4-7 Influence of percentage of on-time on finishing performance

4. 4. 2 加工液の決定

図4-8に種々の水溶性加工液でアルミナを加工した場合の加工量 ΣD を示す。使用砥石はSD4000M ($\sigma_b=200$ MPa)である。図(a)に示す加工液 A_c は添加物が多いため反応性に富み、砥石ボンド剤の主成分の銅と反応して粘着性のある黒色の析出物を生成し、砥石作業面に付着して目づまりを誘発してしまう。このため、図にみられるように加工量は少なく、加工開始直後砥石がすぐに目づまり状態となっている。そこで、添加物を減らして反応性を抑えた加工液 B_c を用いてみた。図(b)にみるように、加工が進行しても加工量は増え続けており、砥石の切削性は大いに改善されていることが分かる。ところが、まだわずかに析出物を生じ、白色のアルミナの加工面が変色してしまう。そこで、さらに添加剤を減らした加工液 C_c を用いてみた。図(c)にみるように、加工量は図(b)に比較すると少し劣るが、それでも砥石の切削性は持続しており、また析出物を生じることもなく、安定した加工状態が得られている。従って、アルミナの加工にはアミン系化合物を主成分とする C_c が適していることが分かる。

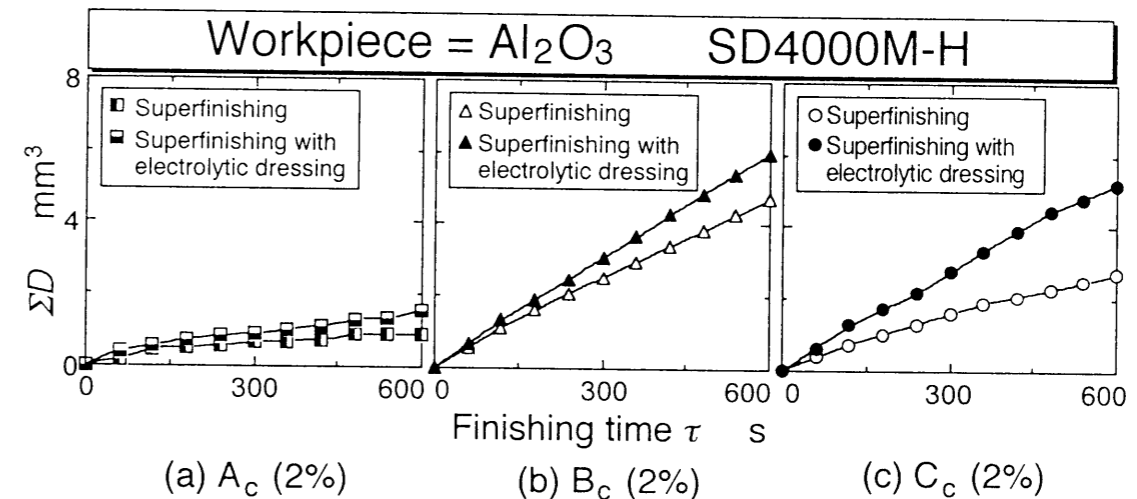


Fig. 4-8 Comparison of superfinishing performance of coolant type

4. 4. 3 砥石圧力の影響

一般に定圧加工において、加工物の形状精度が改善されるためには、砥石圧力 P_n が大きい状態で加工量が多くなり、 P_n が小さくなると加工量が減少する正常な加工状態になければならない。図4-9は P_n が砥石の切削性におよぼす影響を調べているが、 P_n が大きくなるに従って砥石切り込み深さ \bar{d} が大きくなっており、かつ k_s はほぼ一定であることから砥石は正常な切削状態にあることがわかる。従って、水溶性加工液を用いた場合でも電解ドレッシングを併用することにより正常な切削を行うことができる。

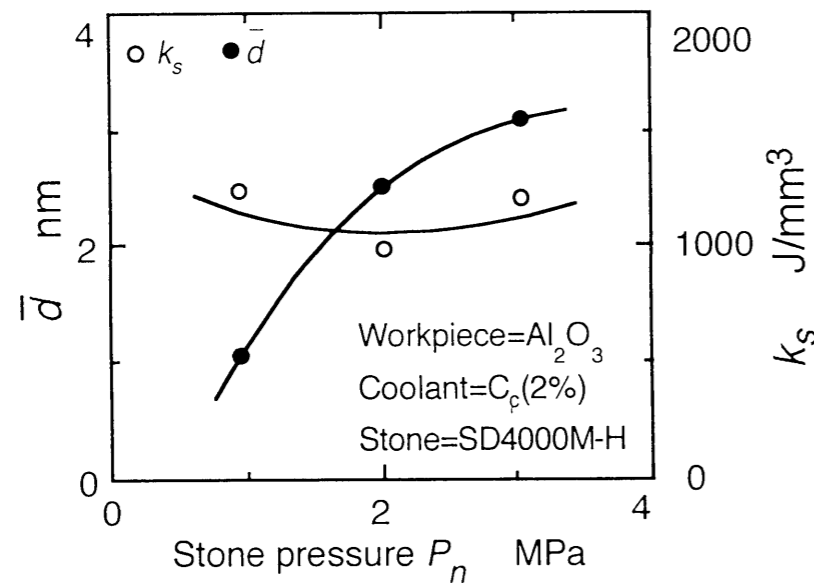


Fig.4-9 Influence of stone pressure on finishing performance

4. 4. 4 砥粒保持力の影響

超仕上では微粒砥石を用いることから、砥石の切削性を持続させることは難しい。砥粒保持力が大きい砥石では目つぶれ状態となり易く、切りくずの排出が不可能になってしまう。一方、保持力が小さい砥石では、目こぼれ状態となり、砥石の切削性は良いが砥石損耗が多く仕上比（研削比に相当）は小さくなって実用的でない。従って、砥石に適度の自生作用を持たせる必要があるが、砥粒保持力の調整が難し

い。ところが、電解ドレッシングを施す場合、電解の強さをコントロールすることにより砥石の自生作用を調整でき、砥石の設計が容易になる期待が持てる。そこで、一般の加工で用いられる砥石よりはるかに大きな保持力を持つ砥石を2種類作り、その影響を調べてみた。図4-10に砥石の砥粒保持力が加工量 ΣD に及ぼす影響を示す。ここでは砥粒保持力を砥石の曲げ強度 σ_b で表しており、 σ_b が大きい砥石ほど保持力が大きいと判断できる。図では、砥粒保持力が高い $\sigma_b=200\text{MPa}$ の方が $\sigma_b=140\text{MPa}$ の砥石の約3倍の加工量が得られており、この加工条件では保持力の大きい砥石がはるかに有利なことがわかる。すなわち、電解条件を変えることにより幅広い加工特性を得ることができるわけである。 $\sigma_b=140\text{MPa}$ の砥石の場合でも、電解条件を変えれば当然異なる結果が得られるが、電気量を少なくすると加工液の流れ方や砥石作業面の状態などわずかな変化が大きく影響することになり、安定した電解状態を得にくくなる。このため一般的には、砥石の切削性を電解条件で幅広くコントロールすることができるなどの利点もあり、砥粒保持力の大きい砥石を用いるべきといえる**。

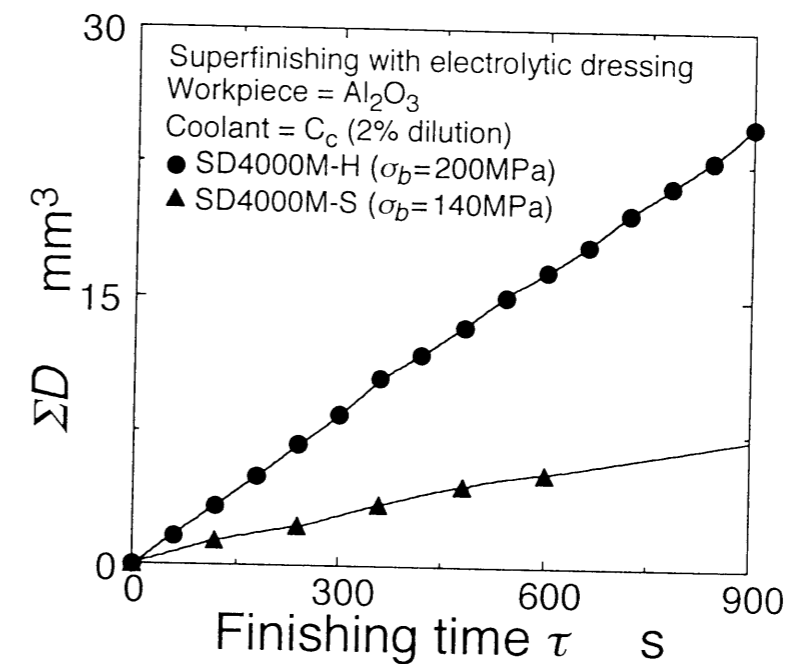


Fig. 4-10 Influence of bending strength of SD stone

** 電気量を大きくしすぎると、4. 4. 2節に述べた様な析出物を生じる恐れが出てくるため、おのずと制限を受けることになる。

図 4-11 は砥石粒度の影響を調べた結果である。先の結果をふまえて砥粒保持力が高い砥石を用いているが#8000の高粒度の砥石においても加工が可能となっており、優れた仕上げ面粗さが得られている。

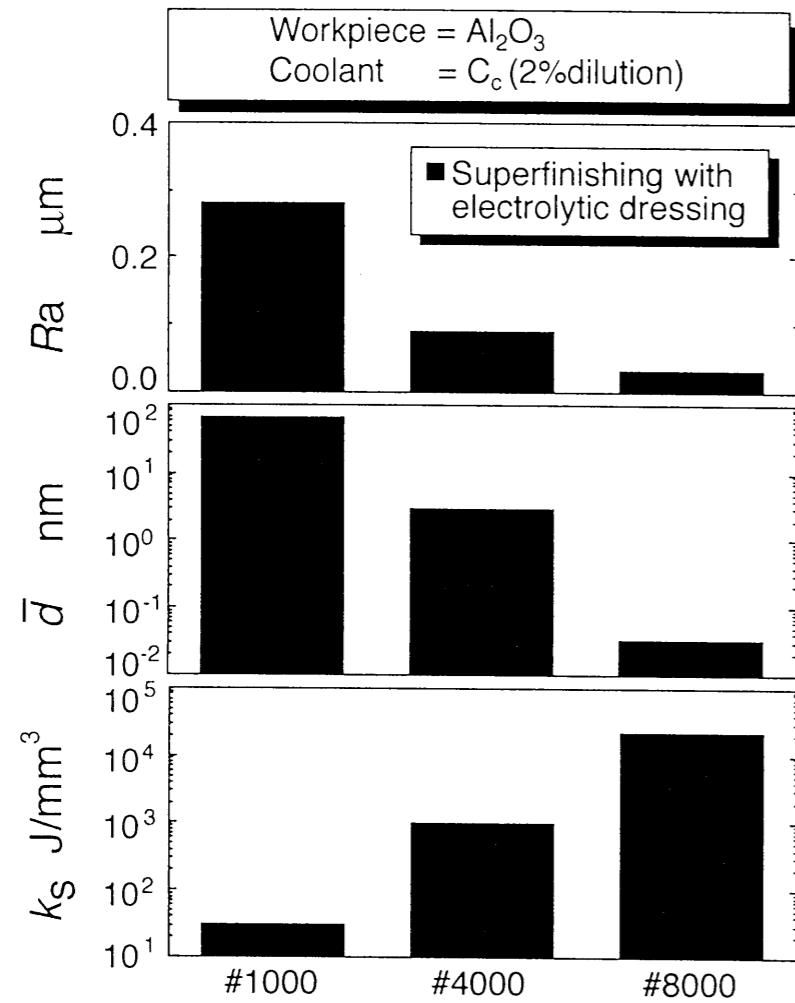


Fig. 4-11 Influence of grain size on finishing performance

4. 5 油性加工液との比較

これまでの結果より、水溶性加工液 C_c を用いてアルミナをSD4000M ($\sigma_b=200\text{MPa}$) 砥石で加工する場合、電極面積=1/20, ギャップ $y_0=1.0\text{mm}$, $n_c=7.7\%$ が最適な加工条件であることが分かった。そこで、この条件のもとで得られる加工特性を従来の加工に油性加工液を用いた場合と比較してみた。図 4-12 にみるよう

に、水溶性加工液を用いた場合でも電解ドレッシングを併用することにより砥石切り込み深さ \bar{d} が油性加工液を用いた場合に比べて3倍近くも大きくなっており、十分対抗できることが分かる。

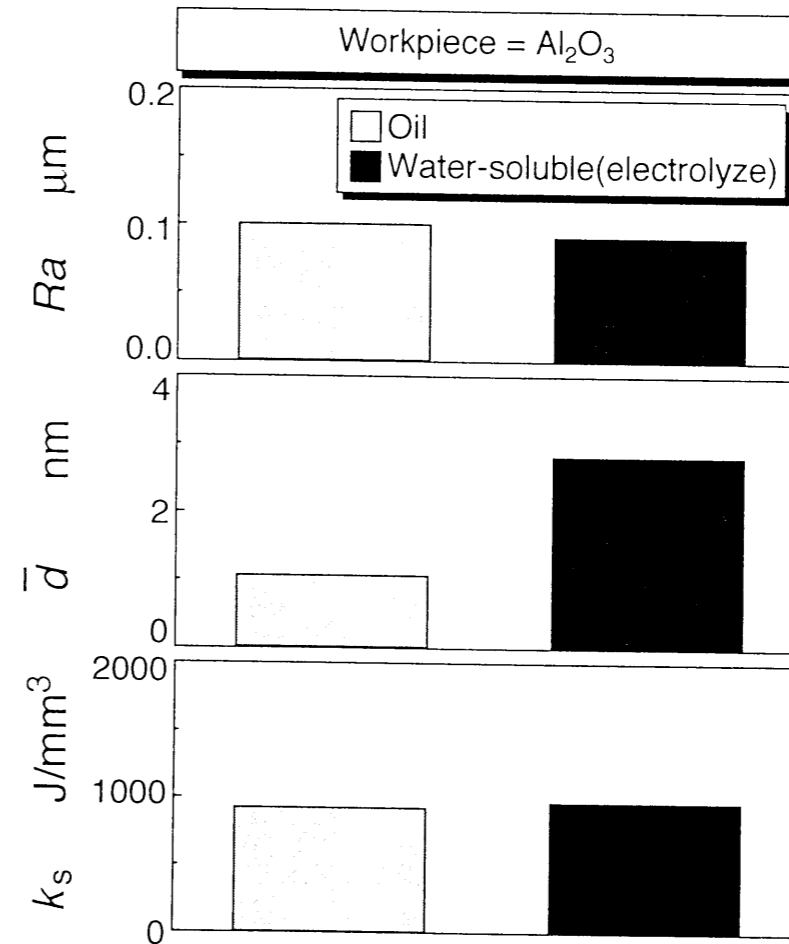


Fig. 4-12 Influence of coolant type on finishing performance

4. 6 軟鋼の加工への適用

軟鋼の加工では長くて溶着性に富む切りくずを生じることから、激しい目づまりが予想され、アルミナの電解条件ではドレッシング効果を期待することは難しい。そこで電極と砥石間のギャップを $y_0=0.5\text{mm}$ とし、より強い電解条件で加工してみた。

図 4-13 (a) は加工液 C_c を用いた加工量 ΣD であるがアルミナで優れた性能を発揮した加工液も軟鋼に対しては切りくず排出能力が劣るため砥石の目づまりが激しく、切削性が大きく低下している。また、電解ドレッシングの効果もほとんど現れていない。そこで界面活性剤を添加し浸透性を向上させた加工液 D_c を用いてみた。図 4-13 (b) にみるように加工量 ΣD が大きく砥石が切削性を持続しており、電解ドレッシングの効果が大きく現れている。

次に、加工液 D_c に対して濃度 C_o の影響を調べてみた。図 4-14 にその結果を示す。C_o=2% で加工量 ΣD がピーク値をとり、5% 以上濃度を高くしても加工量 ΣD は大きく変化せずほぼ一定値となり、濃度を高くする効果はないことがわかる。2% 程度であれば使い捨てが可能になり、加工液の管理を極めて簡単にできる利点もある。

図 4-15 にこれらの結果をもとに軟鋼を加工したときの加工特性を示す。電解ドレッシングを行うと \bar{d} が大きく、 k_s が低く抑えられて砥石の切削性が大きく向上していることがわかる。電解ドレッシングにより目づまりの激しい軟鋼の加工にも水溶性加工液を使用することが十分可能といえる。

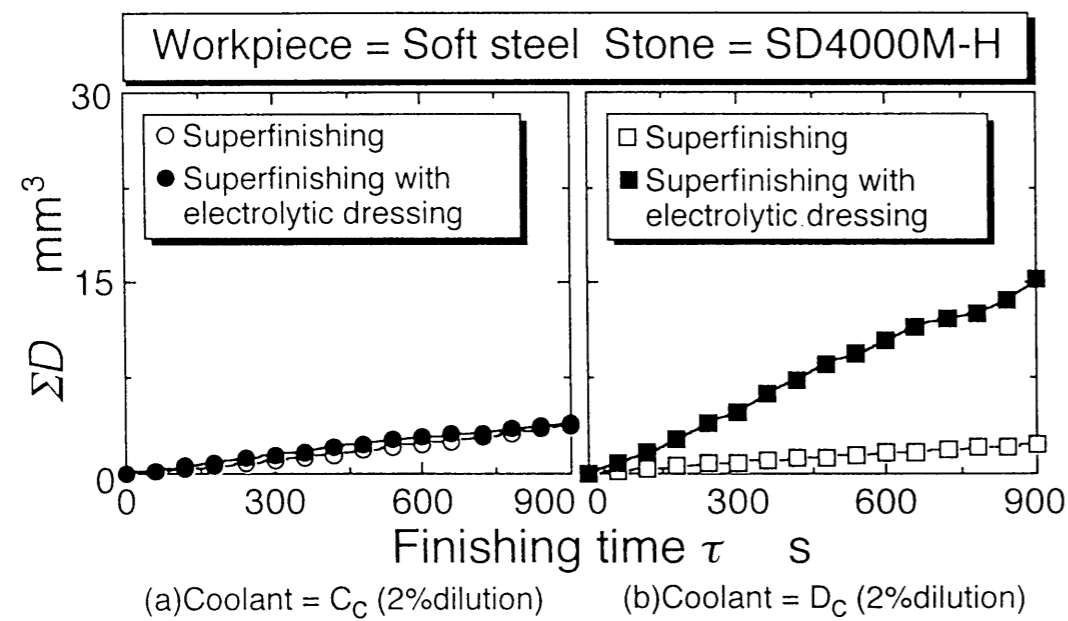


Fig. 4-13 Comparison of superfine finishing performance of coolant type

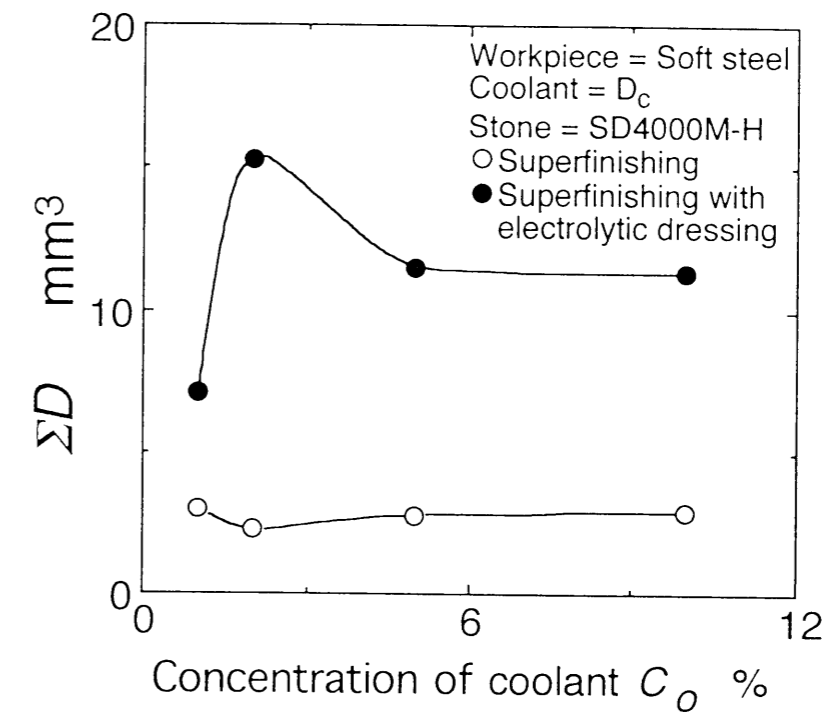


Fig. 4-14 Influence of on finishing performance

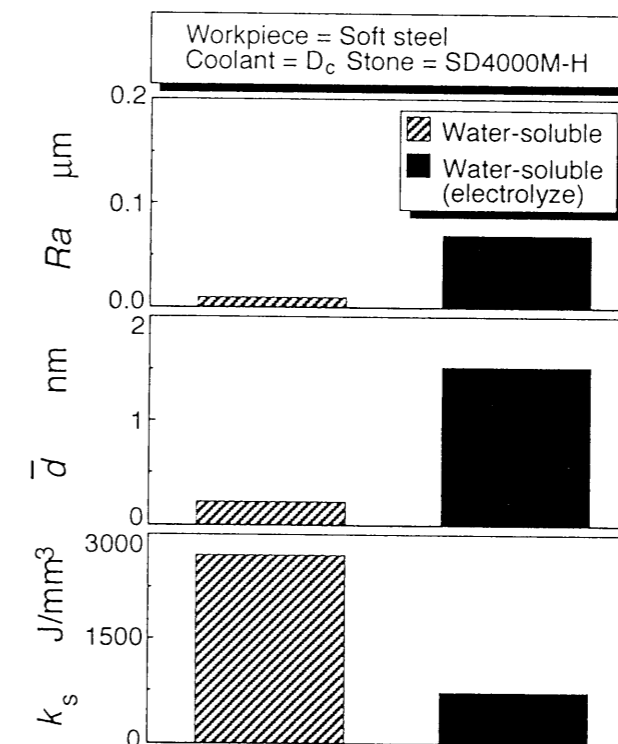


Fig. 4-15 Influence of electrolytic dressing on finishing performance

4. 7 結 言

本章では加工ラインの簡素化を目的とし、油性加工液の代わりに水溶性加工液を用いて常圧焼結のアルミナ、軟鋼（S15C相当）の超仕上加工を行い、水溶性加工液の有用性を検討した。また、超仕上加工に電解インプロセスドレッシングを適用する上で、適する電解条件・砥石圧力・砥粒保持力・加工液についても詳細に検討を加えた。さらに、一般に超仕上加工で用いられる油性加工液との加工性能の比較を行い、水溶性加工液の有用性について検討した。

得られた主な結果は次のようである。

- (1) 電解インプロセスドレッシングを超仕上に適用することにより、水溶性加工液を使用しても超仕上加工は可能である。
- (2) 加工液には、反応性を抑え界面活性剤を大量に含有するソリューションタイプの研削液が適する。
- (3) 最適電解条件は加工物により異なり、目づまりを生じやすい材料では強い電解インプロセスドレッシングを必要とする。
- (4) 砥粒保持力の強固な砥石において、電解インプロセスドレッシングの有効性が高くなる。
- (5) 砥粒粒度が細かい砥石においても電解インプロセスドレッシングの効果は大きく、切りくずを生成する加工が可能となる。

参考文献

- 4-1) 例えば、山本 明，鈴木晋作：切削油剤とその効果，朝倉書店，(1966) 6.
- 4-2) 例えば，H. Ohmori and T. Nakagawa：Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-Process Dressing, Ann. CIRP, Vol. 39/1 (1990) 329.
- 4-3) 上田隆司，花見真司，平野 聡，山本 明：ファインセラミックスのホーニング加工—ダイヤモンド砥石の結合剤が切削性能に及ぼす影響，精密機械，51，6 (1982) 1195.
- 4-4) 上田隆司，山本 明：ホーニング機構に関する一考察，精密機械，48，11 (1982) 1514.
- 4-5) T. Ueda and A. Yamamoto：An Analytical Investigation of the Honing Mechanism, Trans. ASME, Eng. Ind., 106, Aug. (1984) 237.
- 4-6) 上田隆司，金曾久佳，杉田忠彰：超仕上の加工機構に関する研究，日本機械学会論文集C編，

57, 538 (1991) 2154.

4-7) 佐藤敏一：電解加工と化学加工，朝倉書店，(1970) 35.

第5章 砥石の切れ味制御

5.1 緒言

超仕上げ加工では砥石が切削状態から磨き状態へと変化することにより短時間に優れた加工面を得ることができる。ところが、砥石寿命が短いことから、生産性に重点を置く場合、ダイヤモンドやCBNといった超砥粒砥石が用いられるようになってきている。超砥粒砥石を用いた場合、ボンドによる砥粒保持力が大きいこと、砥粒が磨耗しにくいことなどから、普通砥石のように短時間で切削状態から磨き状態へと変化させることはできない。このため砥石は常に切削状態を保つように工夫されており、仕上げ面粗さを向上させるためには粒度の細かい砥石に交換する必要がある。このとき、砥石の切れ味を加工中にコントロールすることで、加工状態を切削状態から磨き状態へと意図的に変化させることができれば、一つの砥石を粗加工から仕上げ加工までの広い範囲で使用できる期待が持てる。また、ダイヤモンド砥石は一般に加工材料に合わせて砥粒保持力を選ぶことから、材料が多種類に及ぶ時、異なる結合度の砥石を多数準備する必要がある。ところが、砥石の自生作用をコントロールすることにより、任意の切れ味を砥石に持たせることができれば、わずかな種類の砥石で広い範囲の加工材料をカバーできる可能性もある。さらに、金型のような加工表面の大きな材料を長時間かけて仕上げる時、加工状態を一定に保つことは難しく、加工を中断してドレスを行わなければならない。しかし、加工抵抗を監視信号として砥石の切れ味を一定にコントロールできれば、長時間の加工が可能となる。

一方、フライスや研削などによる加工ラインに超仕上げを組み込む場合、油性加工液の使用が大きな障害となっており、研削液と同じ水溶性加工液を用いることが望まれている。また、廃液処理の面からも水溶性加工液の使用は有利である。ところが、水溶性加工液は浸透性に劣るため、砥石作業面からの切りくず除去能力に劣り、このままでは砥石はすぐに目づまり状態となって加工が継続できなくなる。

前章で電解インプロセスドレッシングを併用して、砥石の目づまりを防ぎ、自生作用を適度に促進する方法について詳細に検討し、水溶性加工液の使用が十分可能

であることを確かめてきた。

そこで本章では、超仕上げ加工に水溶性加工液を用いて電解インプロセスドレッシングを併用することにより、ダイヤモンド砥石に任意の切れ味を持たせ、意図する加工状態をインプロセスで作りながら行う新しい加工法の可能性について検討してみた。

5.2 実験方法

5.2.1 実験装置

実験は砥石に一定の圧力を与えて円筒状加工物の外周面を仕上げる円筒超仕上げで行った。図5-1に実験装置の模式図を示す。本実験装置では従来の超仕上げ加工に電

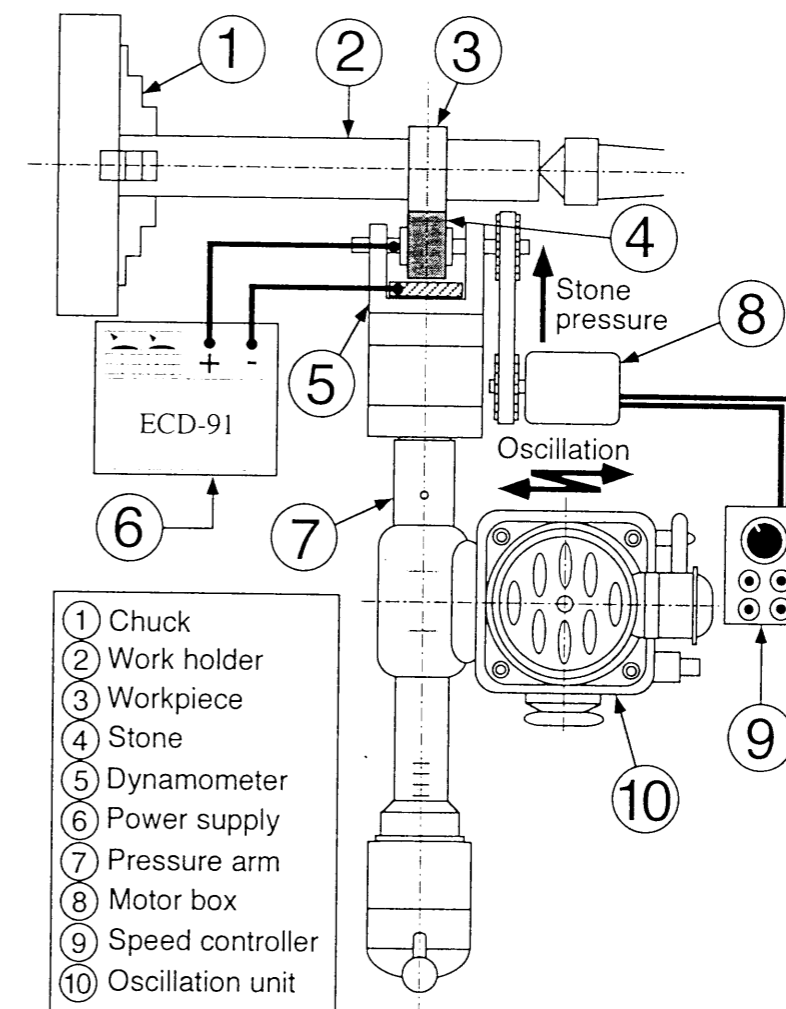


Fig. 5-1 Schematic illustration of main part of superfinishing machine

解インプロセスドレッシングを併用するため、従来の円筒超仕上装置と異なり、角柱状砥石の代わりにリング状砥石④を用いている。リング状砥石のエアカット部を種々の条件下で電解インプロセスドレッシングし、スピードコントロールモータ⑧で超低速回転させることにより、切れ味を調整した砥石を加工に用いることができる。砥石の回転速度は加工物の回転速度に比べて非常に小さく（例えば、3.14:272 (rpm)）、従来の超仕上と同等な加工状態が期待できる。円筒状加工物③はワークホルダ②に取り付け、旋盤のチャック①に固定して回転運動を与えている。砥石は切削抵抗測定用動力計⑤を介して加圧アーム⑦により一定圧力で押し付けるとともに振動ユニット⑩により加振する。電解電源⑥には直流パルス電源 ECD-91（（株）ソディック製）を用いている。

図5-2に加工物－砥石－電極の配置を示す。図中の矢印は加工物および砥石の回転方向を示す。加工物－砥石間の接触はリング状砥石を用いているため線接触に近い状態となる。このため、小さな砥石押し付け力でも砥石圧力は大きくなる。また、従来の円筒超仕上装置に比べ、加工物－砥石間の切りくず排出性に優れている。電極面積は砥石作業面積の1/4とし、砥石－電極間のギャップは1mmとした。図5-3に直流パルス電源より供給されるパルス幅（オンタイム、オフタイム）の定義を示す。実験中、印加電圧は90V一定とした。電解作用の調節には供給電圧パルスのオンタイムを1 μ s一定とし、オフタイムの長さを変化させることにより行った。

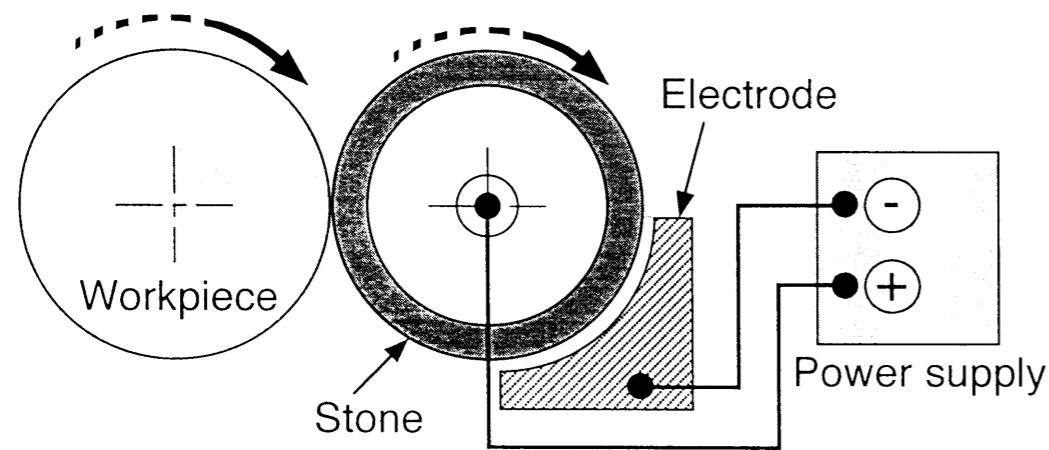


Fig. 5-2 Experimental setup (Workpiece-Stone-Electrode)

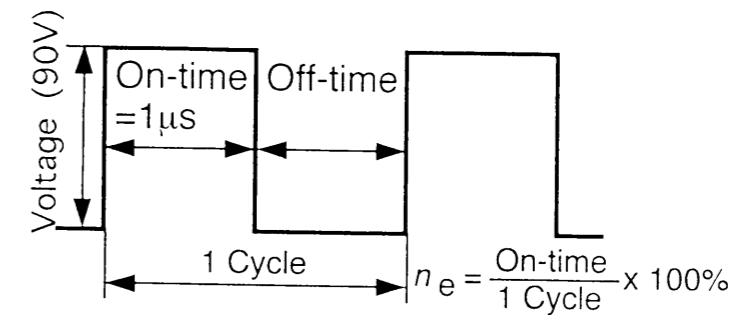


Fig. 5-3 Definition of pulse

測定量は切削抵抗接線方向分力 (主分力) F_t , 切削抵抗法線方向分力 (砥石押し付け力) F_n , 仕上げ面粗さ R_a , 総加工量 ΣD である。なお、振動方向の分力は小さく無視できる。

5. 2. 2 加工条件

表5-1に加工条件を示す。リング状の砥石を用いた新しい加工法であることから、砥石回転数を1~6rpm, 加工物回転数を80~700rpm, 砥石押し付け力を10~110Nの間で変化させ、砥石切り込み深さ \bar{d} が大きく、比加工エネルギー k_s が小さく、かつ仕上げ面粗さ R_a が小さくなる条件を見いだした結果である。

表5-2に使用した砥石、加工物、加工液を示す。砥石はブロンズ系メタルをボンドとした#4000のダイヤモンド砥石である。砥粒保持力を間接的に表す抗折力は $\sigma_b=400\text{MPa}$ と一般の金属材料の加工に用いられる $\sigma_b \approx 100\text{MPa}$ に比べるとはるかに大きくしている³⁾。このまま用いると砥粒保持力が大きすぎるため、すぐに目つぶれを起こす危険があるが、電解ドレッシングでカバーすることになる。

Table 5-1 Experimental conditions

Revolution of stone	3.14 rpm
Revolution of work	272 rpm
Normal force	45-50 N
Frequency	907 cpm
Amplitude	1.6 mm

Table 5-2 Used materials

Stone	SD4000M ($\sigma_b = 400\text{MPa}$) Ring type ($d_o = 45\text{mm}, b = 20\text{mm}, w_s = 5\text{mm}$)
Workpiece	S45C (HV168) SUJ2 (HV772) Al_2O_3 (HV1580) Cylinder shape ($D = 45\text{mm}$)
Coolant	TC-800 X 50 (298K) Water-soluble type

加工物には炭素鋼 S45C, 軸受鋼 SUJ2 および常圧焼結の Al_2O_3 を用いた. いずれも円柱状をしており, 外径 $D=45\text{mm}$, 幅 $B=20\text{mm}$ である.

加工液には, 電解ドレッシング加工に優れた特性を示す研削液 TC-800 (日本グリース (株) 製) を 50 倍に希釈して用いた. 浸透性を向上するため, 多量の界面活性剤を添加している^{5-2), 5-3)}.

5. 3 リング状砥石の仕上げ面への影響

超仕上では一般に角柱状の砥石を一定圧力で加工材料に押し付けることによって加工を行う. このとき, 砥石は加工物と面接触状態となる. ところが, 本研究ではインプロセスで電解ドレッシングを施すため, 図 5-2 にみるようにリング状の砥石を用いている. 砥石は毎分数回転程度のゆっくりとした回転しかしないことから, 加工面上の砥粒切れ刃の軌跡は従来の角柱状砥石と変わらないと考えられる. ところが, 砥石-加工面の接触状態が線接触に近い状態となることから, 加工条痕が従来の超仕上と異なる恐れがある. そこで, 表 5-1 の加工条件のもとで加工した加工物表面を走査電顕で調べた結果が図 5-4 である. 図より, 加工条痕が明瞭に交差して従来と同様の加工面が得られており, リング状の砥石を用いても問題のないことが分かる.

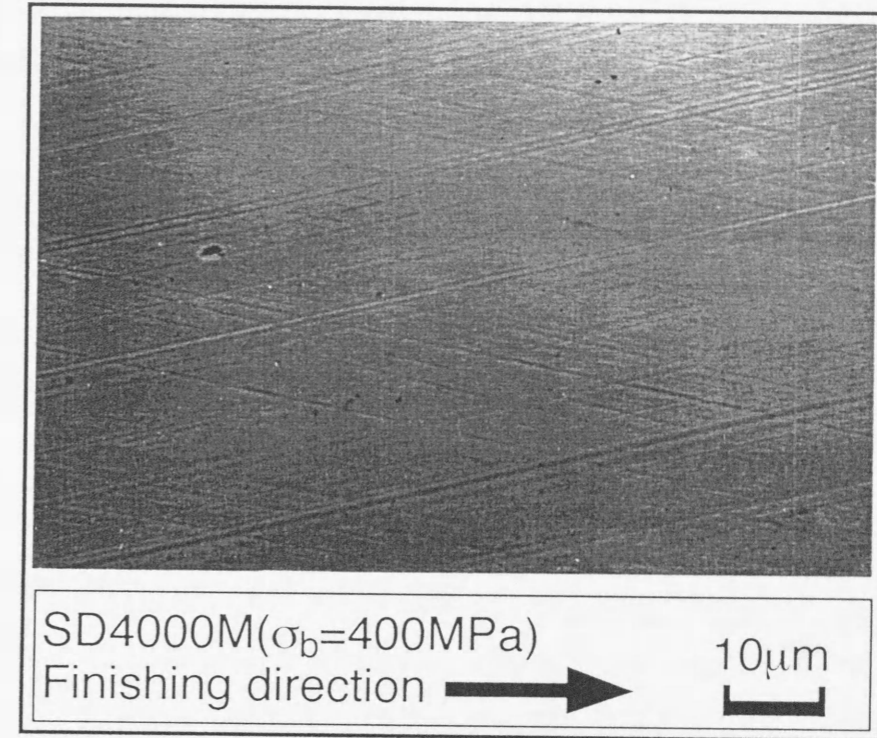


Fig. 5-4 Example of work surface

5. 4 電解ドレッシングの砥石切れ味への影響

超仕上では一般に砥石圧力によって砥石の切れ味をコントロールしているが, 加工量や仕上げ面粗さを微調整する程度でそのコントロール範囲は狭い. 特に, 砥石の切れ味を落として一旦磨き状態にしてしまうと, 砥石圧力の変化だけで切削状態に戻すことは難しい. 磨き状態で砥石圧力を上げれば目つぶれ状態になり, さらに圧力を上げれば砥石の大破砕もしくは破壊に至る危険性もある.

図 5-5 は砥石圧力を一定として, 電解ドレッシングの強度を変化させて切れ味を制御した結果である. 図 5-3 に示す電流パルスのオンタイムの占める比率 n を変化させており, n が大きくなるほど電解ドレッシングの強度は強くなる. 電解ドレッシングが強くなるに従い \bar{d} が大きくなり, k_v が小さくなっており, 砥石の切れ味が大きく向上していることがわかる. しかも, \bar{d} と n の間にはほぼ直線関係があり, 砥石の切れ味制御に電解ドレッシングが適していることがわかる. 一方, 仕上げ面粗さも n に比例

して粗くなるが、上限のあることを示している。なお、 n_e を大きくして電解ドレッシングの強度を強くしすぎると切れ刃砥粒の脱落が起こり、砥石の切れ味は低下することになるため自ずと限界がある。

図5-6は砥石切れ味の経時変化を調べた結果である。 ΣD は加工による全除去体積を表している。電解ドレッシングの強度を弱くした $n_e=1\%$ と強くした $n_e=33.3\%$ の場合の加工量を比較している。いずれの場合も加工時間の経過とともに加工量は直線的に増大しており、電解をかけることにより砥石がコンスタントな切れ味を維持し続けていることがわかる。

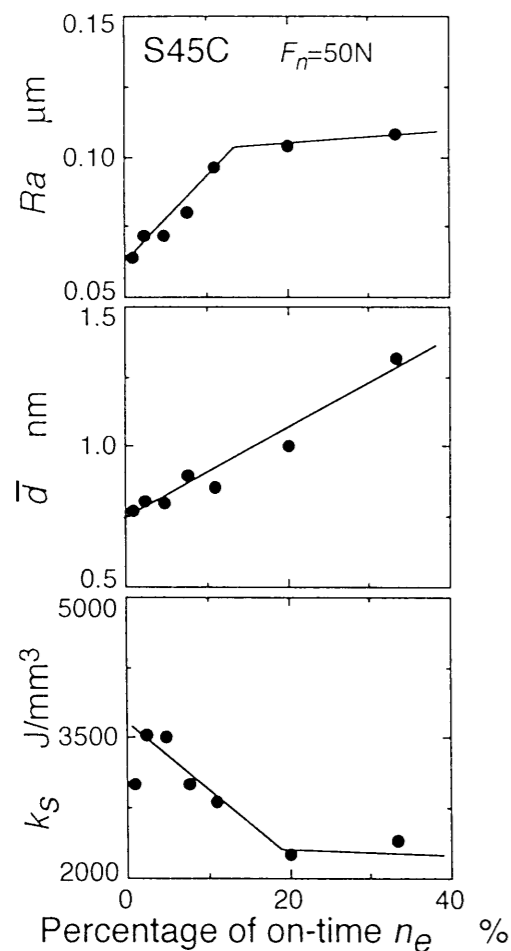


Fig. 5-5 Influence of percentage of on-time on finishing performance

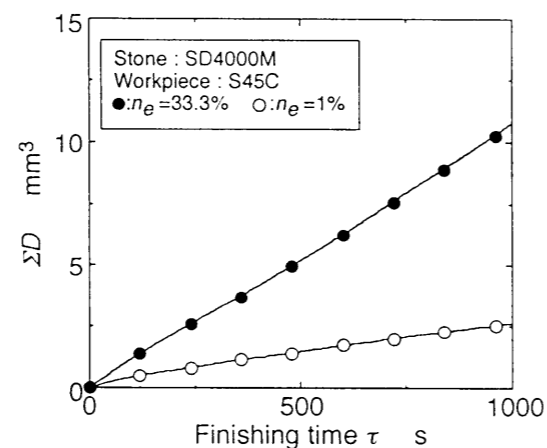


Fig.5-6 Comparison of cutting ability

5. 5 砥石切れ味の制御方法

先の結果より、電解の強さを大きくすると砥石の切れ味が大きく向上すること、逆に小さくすると切れ味を抑えて仕上げ面粗さを小さくできることがわかった。そこで、ここでは具体的に加工中に砥石の切れ味を制御する方法を考えてみる。なお、実験装置の都合上電圧を大きく変化できないため、ここでは電解時間や比率 n_e を変えることによって電解強度を変化させている。

5. 5. 1 電解時間による制御

加工開始時から所定の時間 τ_d だけ電解インプロセスドレッシングを行い、それ以後は電解無しで加工を行い、トータルで120秒間の加工を施している。すなわち、電源のオン・オフによる制御で、単純かつ確実な制御方法である。電解時間 $\tau_d=0, 30, 60, 90, 120\text{s}$ の5つの場合の加工特性を比較した結果が図5-7である。 $\tau_d=0\text{s}$ は全く電解ドレッシングを施さなかった場合、 $\tau_d=120\text{s}$ は加工中電解ドレッシングを続けたことを表している。比率は $n_e=33.3\%$ と一定としている。 τ_d を長くすると \bar{d} は大きくなり、逆に k_s は小さくなっており、砥石の切れ味がコントロールされていることがわかる。また、仕上げ面粗さも変化領域は狭いながらも τ_d に比例して変化しており、 τ_d の長さで砥石の加工状態を十分制御できると言える。すなわち、仕上げ面粗さよりも加工量が要求される場合は、加工開始より加工終了まで電解をかけ、仕上げ面粗さが重視される場合は所定の時間で電解を弱めれば求める粗さに仕上げることができる。従って、電解時間と加工時間との組み合わせにより様々な要求に応える加工が可能となる。

ここで、一旦低下してしまった切れ味を回復できるかどうかを調べておく必要がある。そこで、砥石の切れ味の回復程度を調べるため、30秒ごとに電解電源のオン・オフを行い、その影響を調べてみた。比率 $n_e=33.3\%$ と一定としている。得られた切削特性が図5-8である。電解を止めると \bar{d} が小さくなるが、電解を再開すると \bar{d} は再び増加して元の加工状態に戻っている。仕上げ面粗さは、振幅は小さいものの、オン・オフに従って変化している。しかも、加工時間が長くなってもほぼ同様

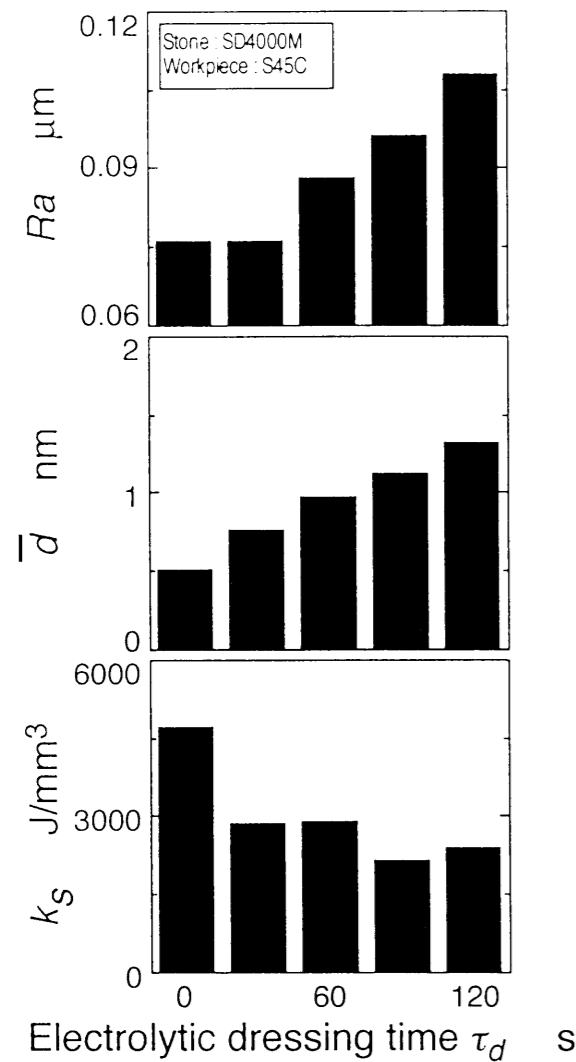


Fig. 5-7 Influence of electrolytic in-process dressing time on finishing performance

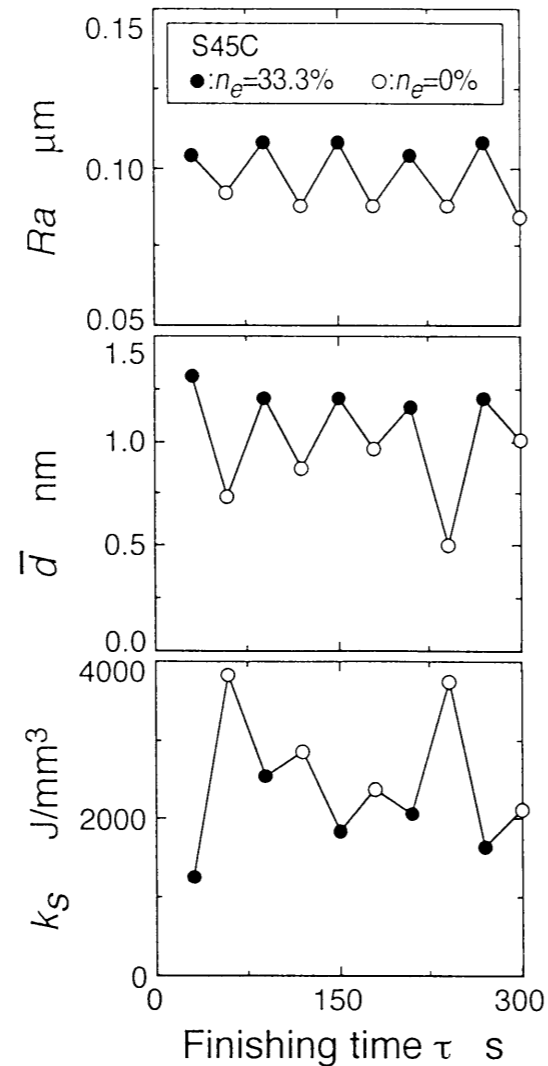


Fig. 5-8 Control of finishing performance by switching of power supply

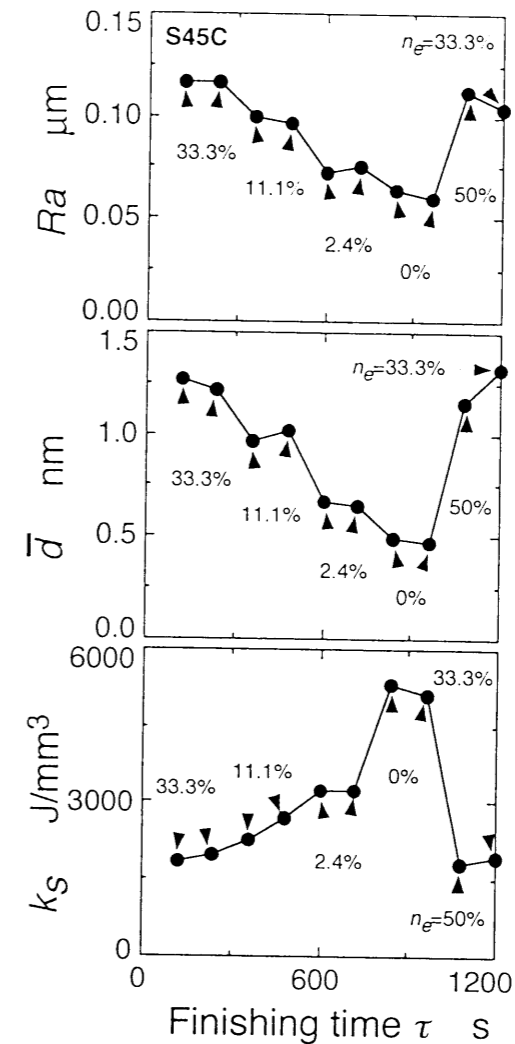


Fig. 5-9 Effect of electrolytic dressing

の傾向を示しており、砥石の切れ味が安定した状態でコントロールされていることがわかる。

5. 5. 2 オンタイムの比率 n_e による制御

比率 n_e を変化させることで、加工進行に伴う砥石の切れ味の変化具合を調べた結果が図5-9である。 $n_e=33.3\%$ の電解ドレスをかけた状態から始め、 $n_e=11.1\%$ 、 2.4% 、 0% と減少させているが、電解ドレスの効果を下げることで、 \bar{d} が減少し k_s が大きくなって砥石の切れ味は抑えられ、仕上げ面粗さが向上している。ところが、 $n_e=50\%$

の電解ドレスをかけると、 \bar{d} が大きくなって k_s が小さくなっており、砥石の切れ味を磨き状態から簡単に回復できる。従って、比率 n_e をコントロールすることによっても砥石切れ味を十分制御できるといえる。

5. 5. 2. a SUJ2 への適用

図5-10に加工材料にSUJ2を用いて比率 n_e の砥石切れ味への影響を調べた結果を示す。図5-5と同様、 n_e を大きくして電解ドレッシングの強度を強めるに従い \bar{d} が直線的に大きくなり、 k_s が減少していることから、 n_e により切れ味をコントロールできることが分かる。すなわち、同一砥石を用いても電解の強さを変えることで異

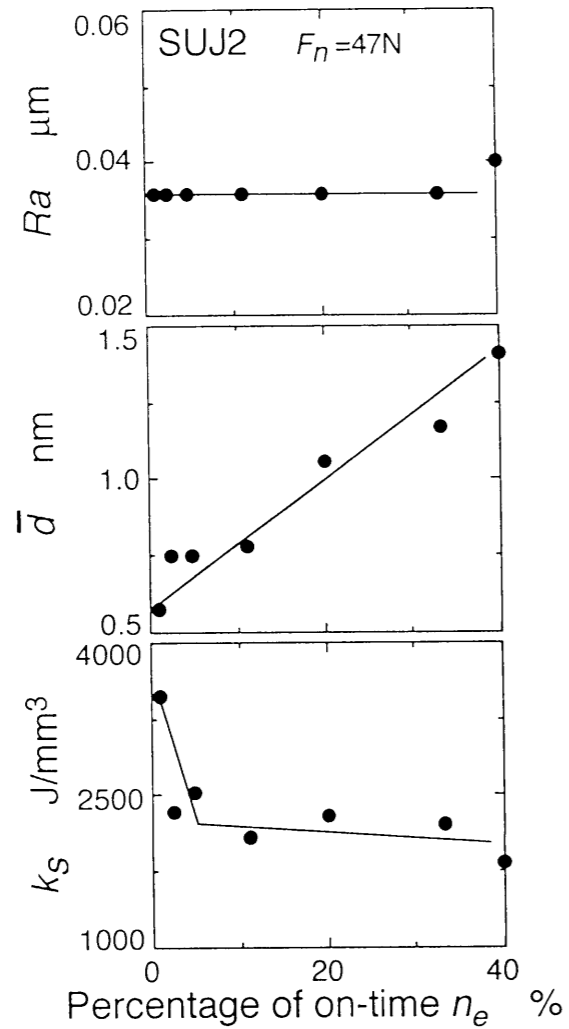


Fig. 5-10 Influence of percentage of on-time (SUJ2)

なる加工材料の加工にも対応できる可能性が十分あることが分かる。しかし、この材料の場合、仕上げ面粗さに対しては大きな変化はなく、粗さに対する制御は難しいといえる。

5. 5. 2. b Al_2O_3 への適用

図5-11に加工材料に Al_2O_3 を用いて比率 n_e の砥石切れ味への影響を調べた結果を示す。図5-5, 10と同様、 n_e を大きくして電解ドレッシングの強度を強めるに従い \bar{d} が直線的に大きくなり、 k_s が減少していることから、 n_e により切れ味をコントロールできることが分かる。また、砥石の切れ味の増加と共に仕上げ面粗さ Ra も増加し

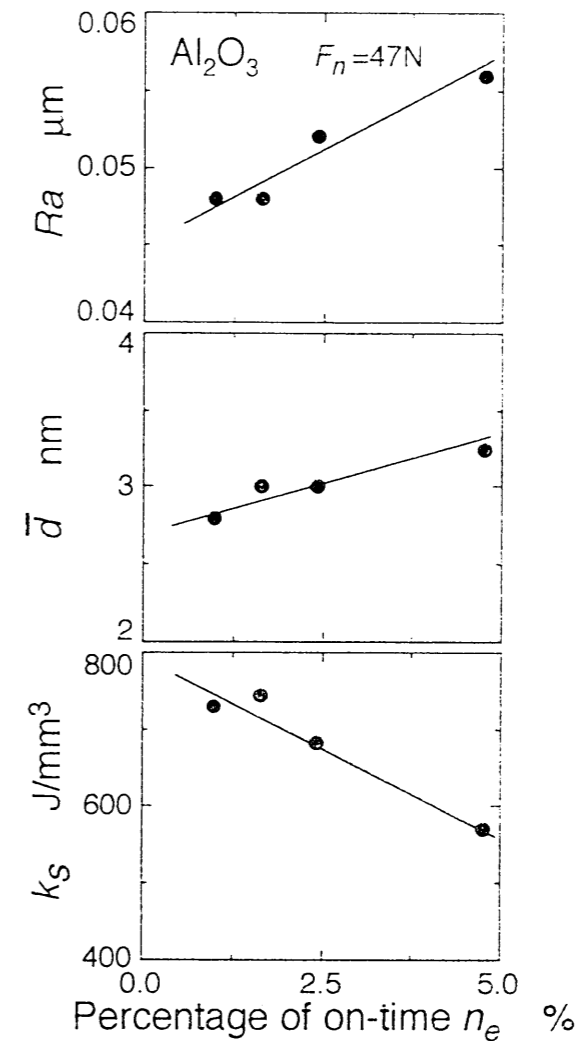


Fig. 5-11 Influence of percentage of on-time (Al_2O_3)

ており、粗さの制御も可能であることが分かる。

Al_2O_3 はS45C, SUJ2などの金属材料に比べ、砥石の目づまりが生じにくいことから、微少な電解を行うことでドレス効果は得られる。同一砥石を用いても電解の強さを変えることで炭素鋼S45C、軸受鋼SUJ2及びセラミックス Al_2O_3 のように多種多様な材料の加工にも対応できる可能性が十分あることが分かる。

5. 6 結 言

本章では、従来の円筒超仕上に電解インプロセスドレッシングを適用するために、角柱状砥石の代わりにリング状砥石を用いる円筒超仕上装置を製作し、実験に用いた。この円筒超仕上装置を用い、電解インプロセスドレッシングの電気量を調整することにより砥石の切れ味の制御を試みた。さらに、加工物として炭素鋼S45Cに加えて、超仕上で最も利用頻度が高いと考えられる軸受鋼SUJ2と硬脆材料である常圧焼結のアルミナを用いての実験も行った。

実験の結果、得られた主な結果は次のようである。

- (1) リング状砥石を用いても電解ドレッシングを行うことにより切削性の維持が可能であり、角柱状砥石と同様の仕上面を得ることができる。
- (2) 電解インプロセスドレッシングを併用することにより、種々の加工状態を意図的に作り出すことが可能であり、容易に所定の加工量、仕上げ面粗さを得ることができる。
- (3) 電解時間のコントロールにより砥石の切削性は制御可能である。
- (4) 電解のオンタイムの比率をコントロールすることにより砥石の切削性は制御可能である。
- (5) 一度失われた砥石の切れ味も電解インプロセスドレッシングを行うことにより、加工を中断することなく加工当初の切れ味に回復可能である。
- (6) 電解の強さで砥石の切れ味をコントロールすることにより、被削性の異なる種々の加工材料を同一砥石で加工できる可能性がある。

参考文献

- 5-1) 上田隆司, 花見真司, 平野 聡, 山本 明: ファインセラミックスのホーニング加工—ダイヤモンド砥石の結合剤が切削性能に及ぼす影響, 精密機械, 51, 6 (1982) 1195.
- 5-2) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 水溶性加工液による超仕上げ, 精密工学会誌, 62, 2 (1996) 252.
- 5-3) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰: 超仕上における砥石の切れ味制御, 1995年度精密工学会秋季学術講演論文集 (1995) 165.
- 5-4) 上田隆司, 山本 明: ホーニング機構に関する一考察, 精密機械, 48, 11 (1982) 1514.

第6章 切削性能のファジィ制御

6.1 緒言

現在、機械加工では高精度・高生産性・低コスト等の生産の合理化を目指し、様々な制御方法が用いられてきている⁶⁻¹⁾。中でも研削加工の分野で多く用いられているのがファジィ制御である⁶⁻²⁾。さらに近年ではニューラルネットワークを利用したファジィ制御なども研削加工に適用されてきている⁶⁻³⁾。

ファジィ制御では他の制御方法とは異なり、複数の制御規則を定め、それら規則の協調により制御を行う。そのため制御対象を数式で表現する必要がなく、制御対象に対する定性的認識があれば比較的簡単に設計可能である⁶⁻⁴⁾。このような理由からも工具にあたる砥粒切れ刃の挙動が複雑で、数式表現が困難な研削加工に対する制御方法としてファジィ制御は非常に有効な制御方法であると言える。

研削加工の一つである超仕上げ加工では、加工途中で砥粒切れ刃が切削状態から研磨状態へと変化することによって仕上面粗さの向上を図っている⁶⁻⁵⁾。このため、一般の研削加工以上に砥粒切れ刃の挙動は複雑となり、加工中の砥粒切れ刃の挙動を数式で表現することは非常に困難である。また、砥粒切れ刃の状態変化が適正でないと、前加工による加工痕が残ったり、砥石作業面の凹凸が加工物表面に転写されたりと、良好な仕上面を得ることが難しくなる。さらに、超仕上げ加工でも、砥石寿命の長いメタルボンド砥石が用いられだしてきており⁶⁻⁶⁾、砥粒切れ刃の状態をコントロールすることは一層困難な問題となってきた。

この問題の解決方法として一般的には粗加工と仕上げ加工とを分けた2段加工⁶⁻⁵⁾が行われている。しかし、2段加工を行うためには複数の砥石を用意する必要があり、加工途中での砥石の交換・ドレッシングが必要となるため、効率的な加工法であるとはいえない。

前章までに超仕上げ加工に電解インプロセスドレッシングを併用することで、超仕上げ加工に水溶性加工液の使用を検討し⁶⁻⁷⁾、さらに、電解インプロセスドレッシングの電気量をコントロールすることで砥石の切れ味を制御する方法を試みた⁶⁻⁸⁾。

そこで本章では、メタルボンド砥石を用いた超仕上げ加工にファジィ制御を取り入れ、砥石作業面の状態をコントロールすることにより一つの砥石で粗加工から仕上げ加工までを可能とするような加工特性の制御を試みる。

6.2 実験方法

6.2.1 実験装置

実験は振動する砥石に圧力を与えてやることで円筒状加工物の外周面を仕上げる円筒超仕上げで行った。図6-1に実験装置全体の模式図を、図6-2に実験装置主要部の模式図を示す。本実験装置では従来の円筒超仕上げ装置とは異なり、角柱状砥石の代わりにリング状の青銅系メタルボンド砥石④を用いる。リング状砥石のエアカッ

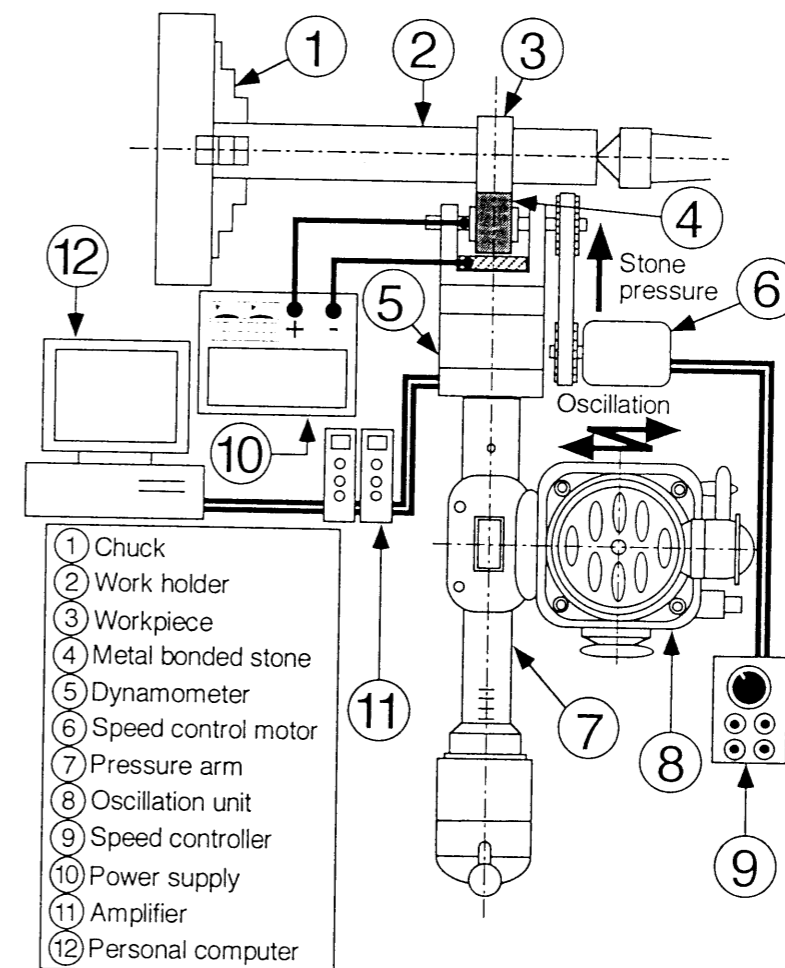


Fig. 6-1 Schematic illustration of superfinishing machine

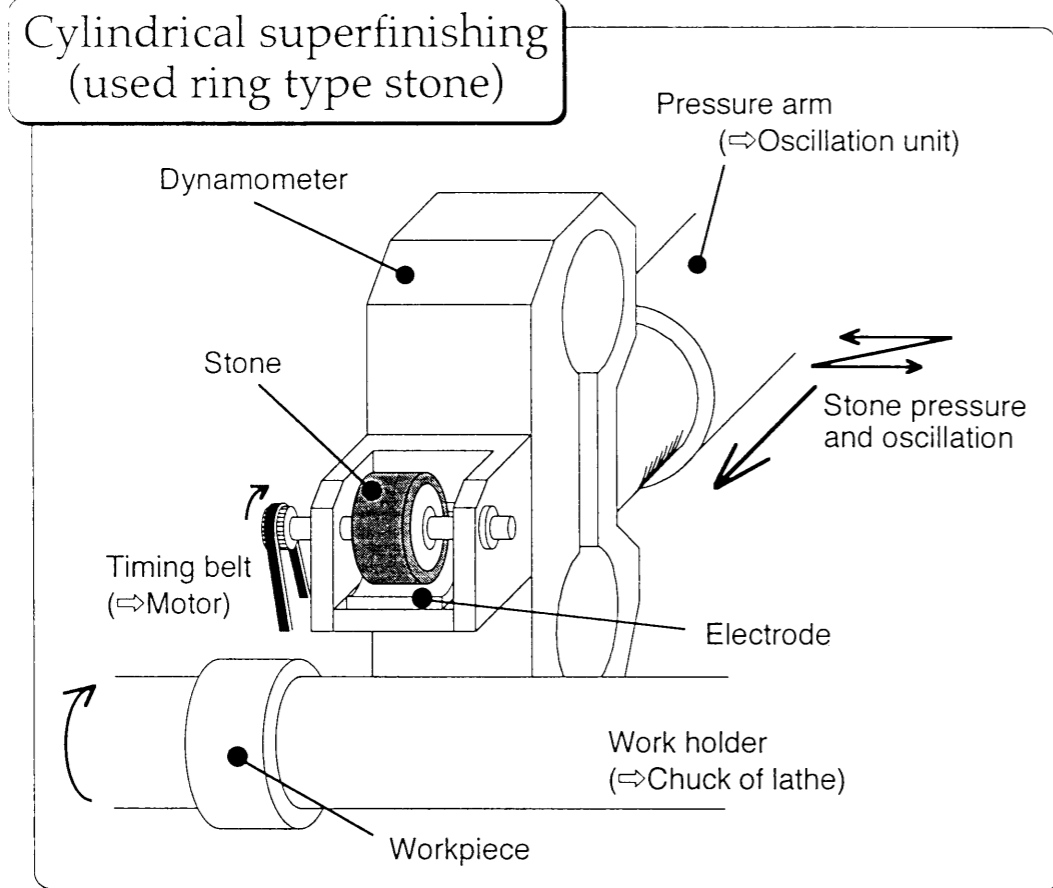


Fig. 6-2 Main part of superfinishing machine

ト部と対偶する陰電極との間に電界を生じさせ、電解インプロセスドレッシングを行うことにより、砥石作業面の状態をコントロールする。さらに、スピードコントロールモータ⑥で超低速回転（3.14rpm、加工物回転速度の約1/90）させることにより常時任意の切れ味を持つ砥石で加工を行うことが可能である。砥石の回転は極低速であるため、加工面上の砥粒切れ刃の軌跡は従来の角柱状砥石と同様で、リング状砥石を用いても従来の超仕上加工と同様な加工が期待できる^{6,9)}。電解電源⑩には直流パルス電源を用いており、オンタイム、オフタイムの設定により電解作用の強弱が制御可能である。印加電圧は90V一定とした。測定量は切削抵抗（主分力 F_t 、砥石押し付け力 F_n ）、加工量 ΔD 、仕上面粗さ Ra である。なお、振動方向の分力は小さく無視できる。

超仕上加工は定圧加工であるために、砥石の切削能力の変化は切削抵抗（主分力

F_t ）の増減に現れる。要するに主分力 F_t が大きな値を示すときに砥石の切削能力は大きく、目づまり・目つぶれ等により切削能力が低下すると主分力 F_t も小さな値を示す。メタルボンドダイヤモンド砥石は一般のWA砥石に比べ、切削能力のコントロールが非常に難しい。そこでWA砥石の加工時間に伴う切削抵抗（主分力 F_t 、砥石押し付け力 F_n ）の変化^{6,9)}を基準として、切削抵抗（主分力 F_t 、砥石押し付け力 F_n ）との偏差を ΔF_t 、 ΔF_n としてファジィ制御の入力値として用いた。また、加工開始直後からの加工経過時間も同様に入力値として用い、ファジィ推論を行う。切削抵抗の時間的推移を監視し、ファジィ制御を行うことによって、意図する加工状態を作り出すような砥石押し付け力および電解インプロセスドレッシングの電気量を出力する。

6. 2. 2 ファジィ制御プログラム

図6-3に実験に用いたファジィ制御プログラムのフローチャートを示す。このプログラムでは大きく分けてプロセスA、プロセスBの二通りの加工を行うことが可能である。プロセスAは加工時間入力型の制御である。入力された加工時間内で砥石を切削状態から研磨状態へとスムーズに変化させるように砥石押し付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量の制御を行う。一方、プロセスBは加工目標値入力型の制御であり、加工目標として加工量、仕上面品位および加工回数等を入力することにより、所要加工時間を切削工程と研磨工程とに分けて算出し、目標加工量および目標仕上面品位に到達するように砥石押し付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量の制御を行う。表6-1に設定可能な仕上面品位と仕上面粗さ Ra との関係を示す。仕上面品位は0～5までの6段階に設定可能で加工における仕上面粗さの重要度を表すことになる。0は仕上面重視、5は加工量重視を表している。入出力データはデータベースとして取り入れられ、必要によりメンバーシップ関数の補正等に利用される。

表6-2にファジィ制御プログラムで用いた制御ルールを示す。表中の F_t 、 F_n は切削抵抗を、Timeは加工経過時間を表している。また、MSP、MEDは各々砥石押し付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量の出力である。実験で用いたファジィ

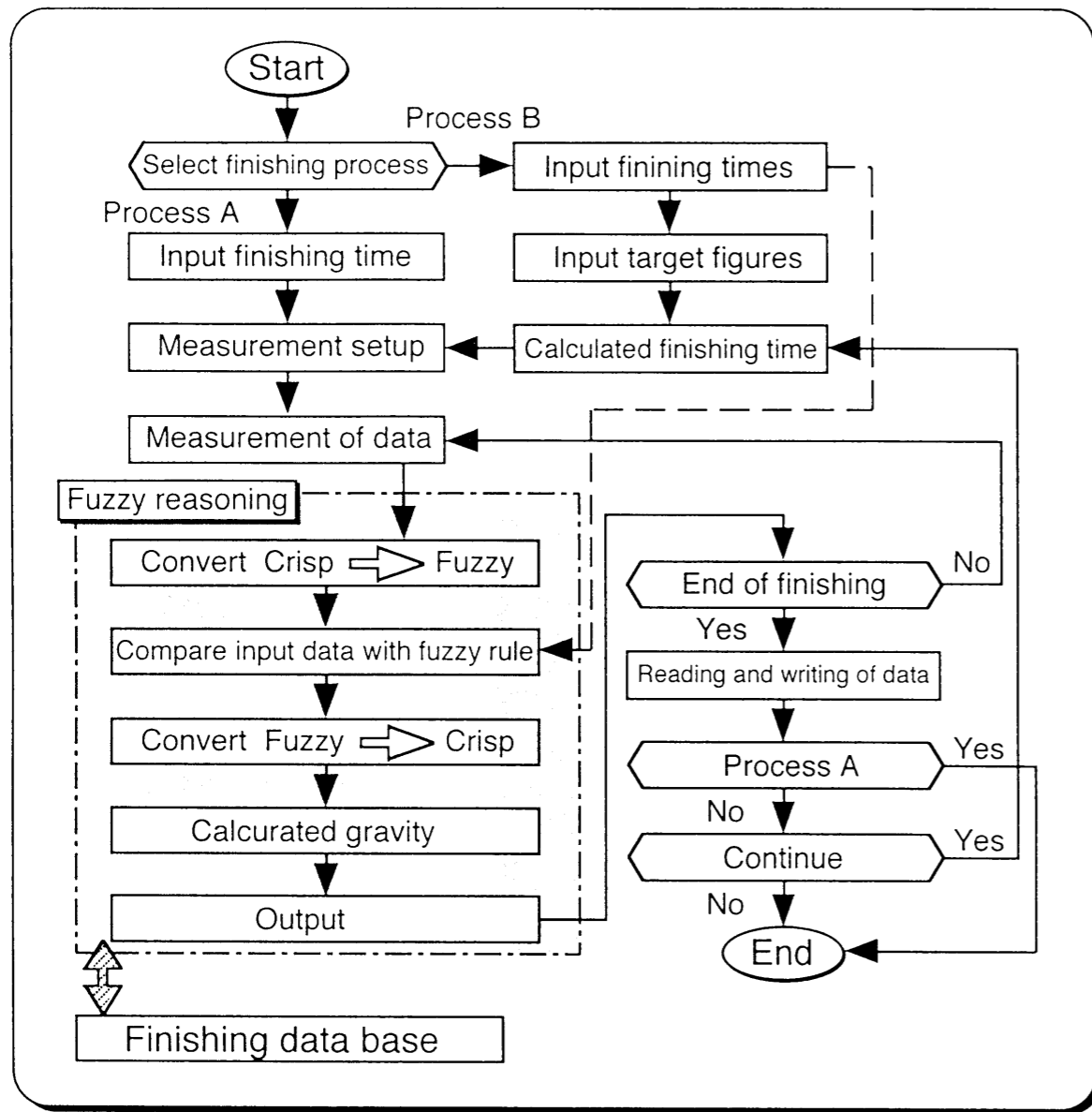


Fig. 6-3 Flowchart of fuzzy program

Table 6-1 Grade of surface roughness

Grade of surface roughness (Ra)

- 0 : 0.060 μ m and less
- 1 : 0.060-0.064 μ m
- 2 : 0.064-0.068 μ m
- 3 : 0.068-0.072 μ m
- 4 : 0.072-0.076 μ m
- 5 : 0.076 μ m and over

Table 6-2 Fuzzy rules

Fuzzy production rules

Rule 1.	if Fn is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 2.	if Fn is "MEDIUM"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 3.	if Fn is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 4.	if Ft is "SMALL"	then MED is "BIG"
Rule 5.	if Ft is "MEDIUM"	then MED is "MEDIUM"
Rule 6.	if Ft is "BIG"	then MED is "SMALL"
Rule 7.	if Fn is "SMALL" and Time is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 8.	if Fn is "SMALL" and Time is "MEDIUM"	then MSP is "BIG"
Rule 9.	if Fn is "SMALL" and Time is "BIG"	then MSP is "BIG"
Rule 10.	if Fn is "MEDIUM" and Time is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 11.	if Fn is "MEDIUM" and Time is "MEDIUM"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 12.	if Fn is "MEDIUM" and Time is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 13.	if Fn is "BIG" and Time is "SMALL"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 14.	if Fn is "BIG" and Time is "MEDIUM"	then MSP is "SMALL"
Rule 15.	if Fn is "BIG" and Time is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 16.	if Ft is "SMALL" and Time is "SMALL"	then MED is "BIG"
Rule 17.	if Ft is "SMALL" and Time is "MEDIUM"	then MED is "BIG"
Rule 18.	if Ft is "SMALL" and Time is "BIG"	then MED is "MEDIUM"
Rule 19.	if Ft is "MEDIUM" and Time is "SMALL"	then MED is "MEDIUM"
Rule 20.	if Ft is "MEDIUM" and Time is "MEDIUM"	then MED is "MEDIUM"
Rule 21.	if Ft is "MEDIUM" and Time is "BIG"	then MED is "SMALL"
Rule 22.	if Ft is "BIG" and Time is "SMALL"	then MED is "MEDIUM"
Rule 23.	if Ft is "BIG" and Time is "MEDIUM"	then MED is "SMALL"
Rule 24.	if Ft is "BIG" and Time is "BIG"	then MED is "SMALL"
Rule 25.	if Time is "SMALL"	then MSP is "BIG"
Rule 26.	if Time is "SMALL"	then MED is "BIG"
Rule 27.	if Time is "MEDIUM"	then MSP is "MEDIUM"
Rule 28.	if Time is "MEDIUM"	then MED is "MEDIUM"
Rule 29.	if Time is "BIG"	then MSP is "SMALL"
Rule 30.	if Time is "BIG"	then MED is "SMALL"

プログラムは表 6-2 中全ての制御ルールを採用しているわけではなく、加工条件等により適宜選択してファジィ推論に用いている。推論方法にはファジィ制御で一般的に用いられている min-max 重心法⁶⁾を用いている。図 6-4 に入力値 (ΔF_t , ΔF_n) に対するメンバーシップ関数を示す。Small, Medium, Big のファジィラベルを用いており、単純化されている。図 6-5 (a) にプロセス A における加工時間のメンバーシップ関数を、図 6-5 (b) にはプロセス B におけるメンバーシップ関数を示す。プロセス B では加工時間を切削工程と研磨工程とに分けて考えるため、プロセス A とは異なる形状を示す。図 6-6 に出力に対するメンバーシップ関数を示す。いずれのメンバーシップ関数もメンテナンス性、処理速度等を考慮して三角型メンバーシップ関数を基本とした形状を用い、ファジィラベルも 3 つに設定している。

ファジィ制御プログラムの動作を確認するためにプロセス A, B に対して一定および変動する切削抵抗を入力値として与え、それに対応する出力を調べた。プロセス A では加工時間を 120 秒間とし、プロセス B では目標加工量 1mm^3 、仕上面品位 0 ($Ra \leq 0.06 \mu\text{m}$) とした。図 6-7 (a) にプロセス A に基準入力 ($F_{tw} - F_t = \Delta F_t = 0$, $F_{nw} - F_n = \Delta F_n = 0$)、要するに WA 砥石を用いたときと同様な F_t , F_n を入力値として与えた場合を示す。砥石押し付け力の出力値 MSP, 電解インプロセスドレッシングの電気量の出力値 MED は WA 砥石の切削抵抗の時間的変化^{6,9)}と同様な傾向を示していることがわかる。このことより、定められた時間内で WA 砥石を用いた場合と同様に、メタルボンド砥石を切削状態から研磨状態へと制御することが期待できる。同様に図 6-7 (b) にプロセス B の場合を示す。切削工程終了（この場合、加工開始より 75 秒前後）までは出力値である砥石押し付け力 MSP, 電解インプロセスドレッシングの電気量 MED とともになだらかな減少を示すが、研磨工程に入ると砥石押し付け力はそのままで電解インプロセスドレッシングの電気量を極端に落としている。このことにより砥石作業面は即座に目づまり状態となり、研磨工程に入るため、効率の良い仕上げが期待できる。図 6-8 は変動入力（基準入力に外乱を加えたもの）を与えた場合の結果である。図より変動する入力に対してもプログラムは適切な出力をしていることが分かる。

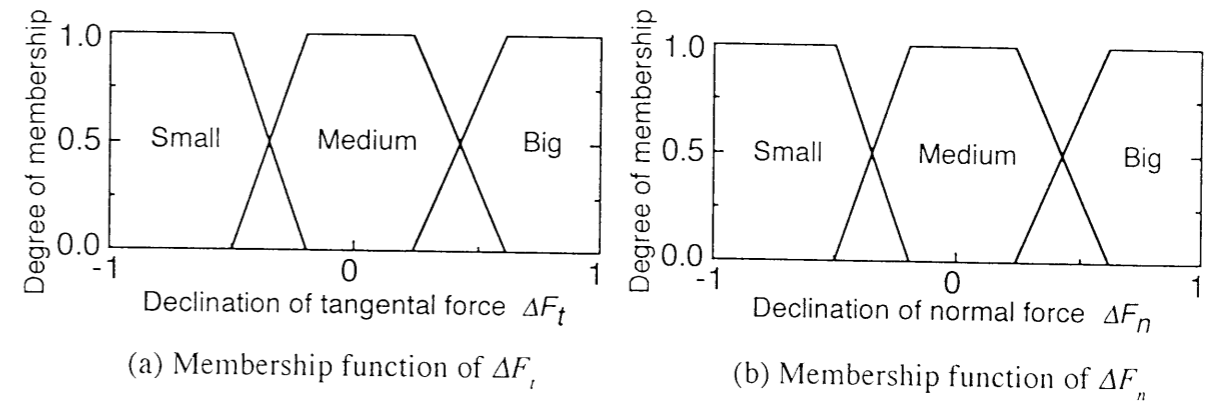


Fig. 6-4 Membership function for input data

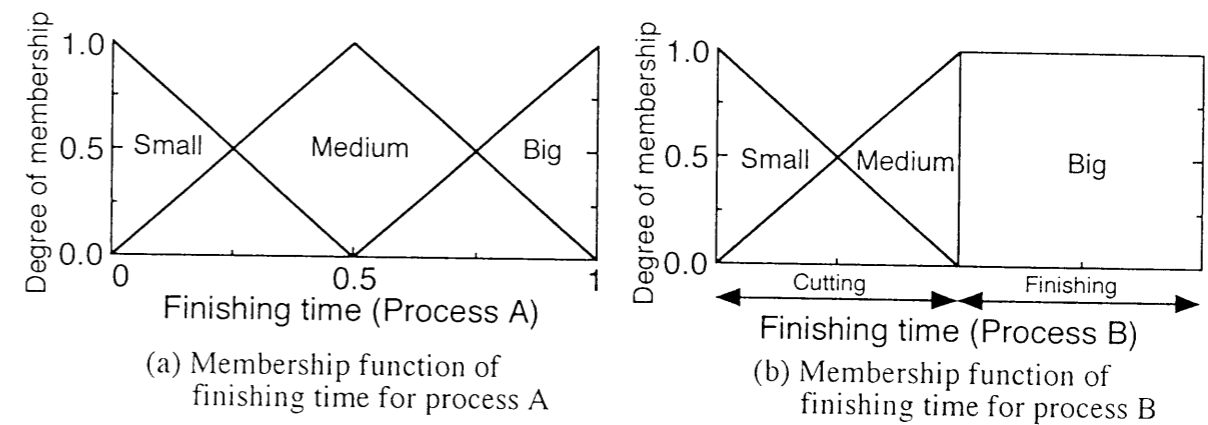


Fig. 6-5 Membership function for finishing time

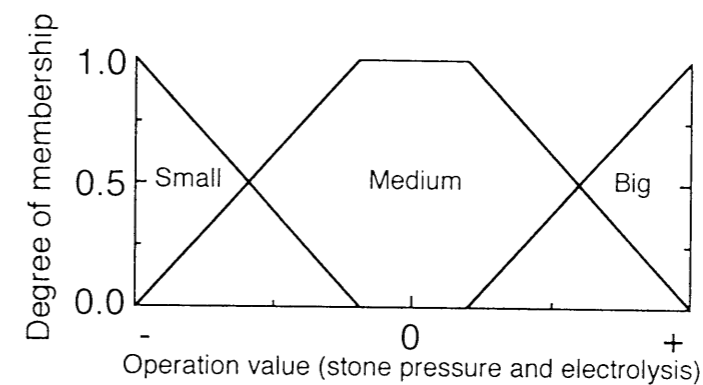


Fig. 6-6 Membership function for output data

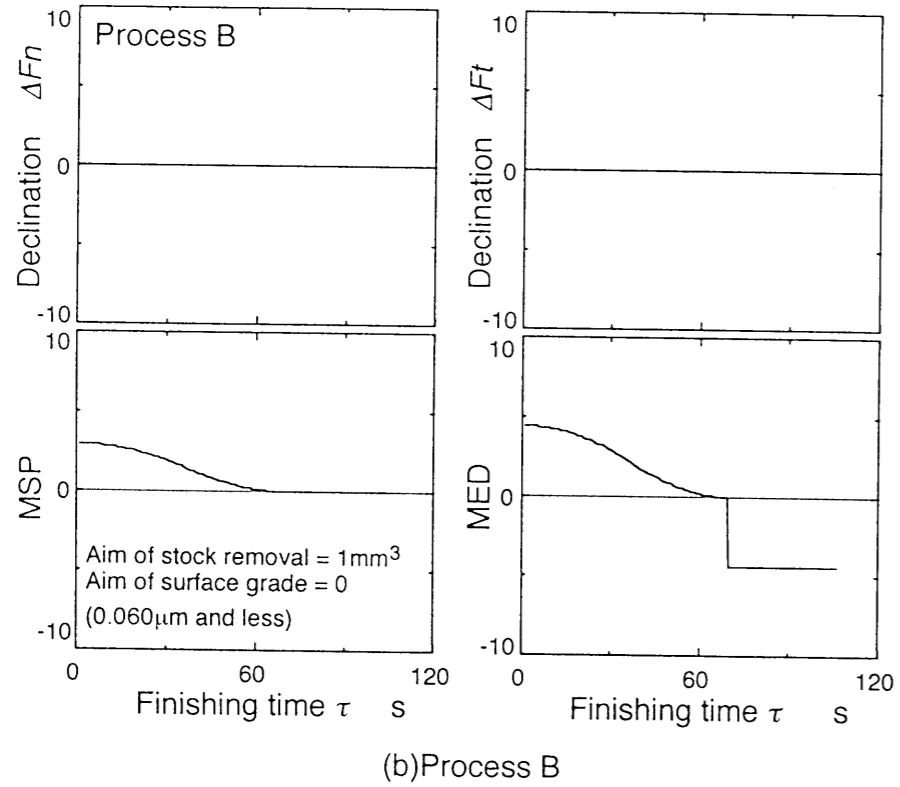
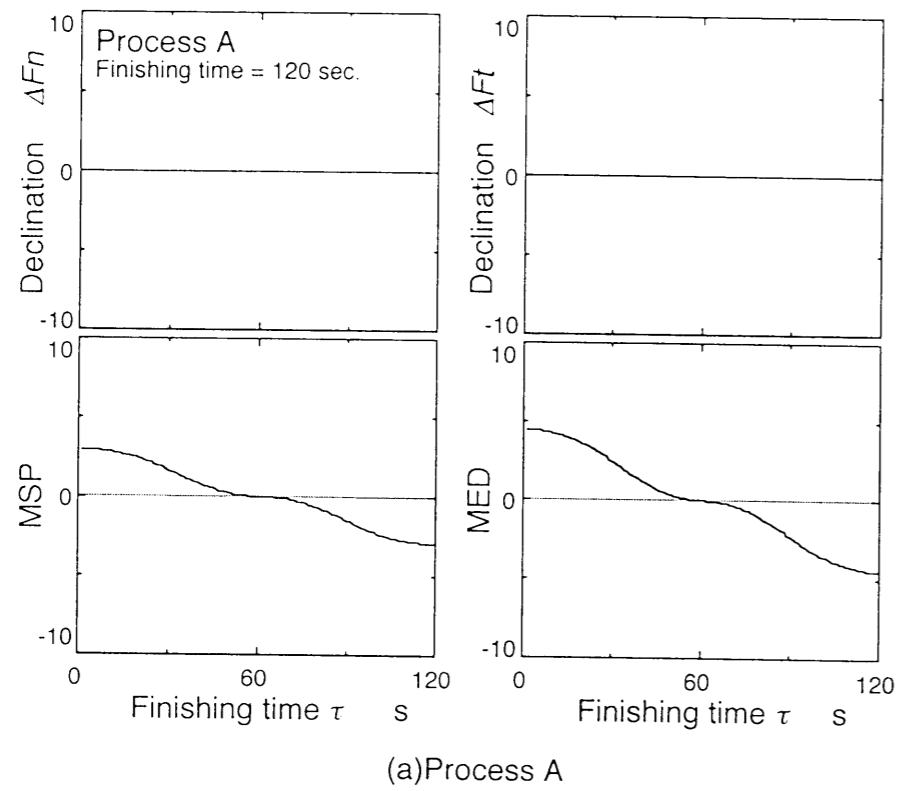


Fig. 6-7 Output toward invariable finishing resistance

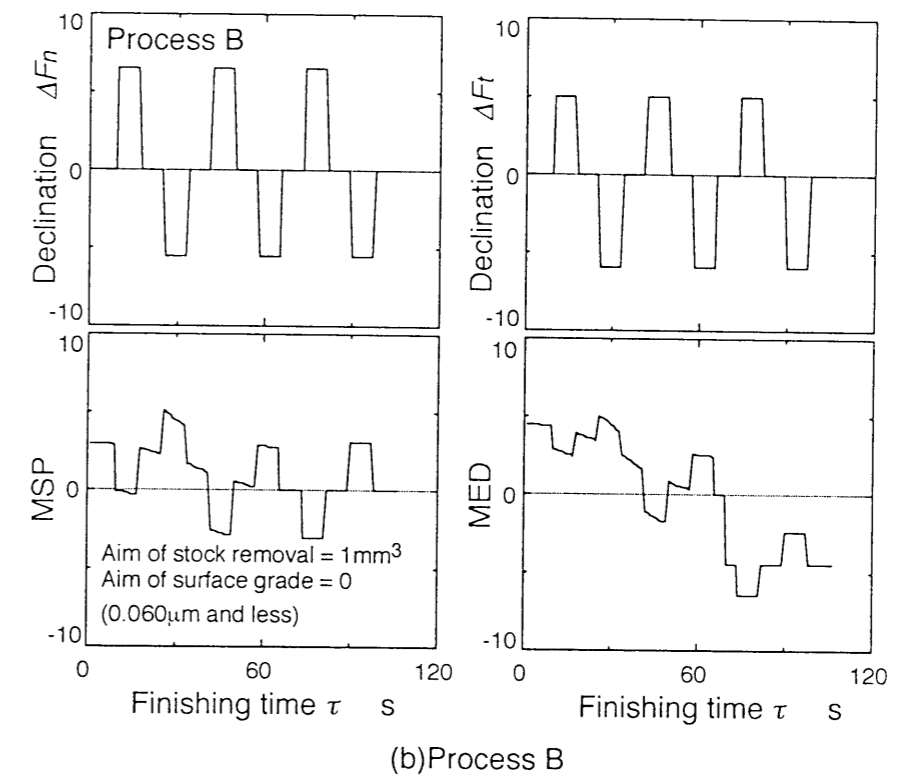
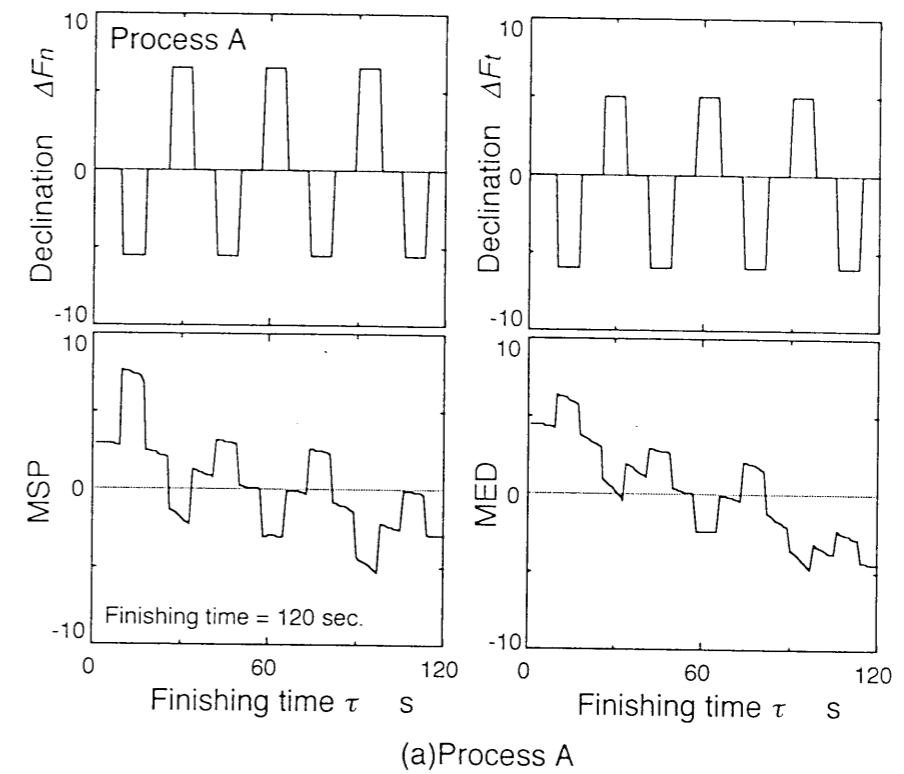


Fig. 6-8 Output toward variable finishing resistance

6. 2. 3 加工条件

表6-3に主な加工条件を示す。砥石にはリング状の青銅系メタルボンドダイヤモンド砥石 (SD4000M: #4000, 抗折強度 $\sigma_b=400\text{MPa}$) を用いた。本実験で用いる砥石は一般の金属材料の加工に用いられる砥石 ($\sigma_b \approx 100\text{MPa}$) に比べ非常に大きな砥粒保持力を持っている^{(6.7), (6.8)}。加工物には円筒状のS45Cを用いた。また、電解インプロセスドレッシングを行うため、加工液には水溶性加工液を用いている。表6-4に使用した加工液の簡単な組成を示す。この加工液は界面活性剤を多量に含有するソリューションタイプの研削液 (50倍希釈: 日本グリース (株) 製 TC-800) である^{(6.7), (6.8)}。なお、加工中の加工液温度は常時監視し、25°C一定に保って実験を行った。電極寸法は砥石作業面積の1/4、砥石-電極間のギャップは1mmとした。

Table 6-3 Main experimental conditions

Stone	SD4000M ($\sigma_b = 400\text{MPa}$)
Workpiece	S45C (HV168)
Coolant	TC-800 X 50 (298K)
Frequency	900 cpm
Amplitude	1.6 mm
Revolution of work	272 rpm
Revolution of sone	3.14 rpm
Initial stone pressure	54 N

Table 6-4 Characteristics of coolant

Coolant		TC-800
Coolant type (JIS)		W2-1
Fatty acid·its derivative	mass %	11
Alkanolamine	mass %	13
Surface active agent	mass %	30
Rust inhibitor	mass %	15
Others	mass %	0.5
Water	mass %	31.5
pH (X30)		8.7
Surface tension (X30, 10^{-3}N/m)		35.5

6. 2. 4 加工条件の評価

実験では砥石押し付け力と電解インプロセスドレッシングの電気量を変化させることによって加工特性の制御を行っている。そのため、加工条件の過酷さの判断には砥石押し付け力と電解インプロセスドレッシングの電気量とを組み合わせた加工条件の評価が必要となってくる。図6-9に砥石押し付け力 F_n と加工量 ΔD との関係を示す。図6-10に電解インプロセスドレッシングの電気量を加工時間中に占めるオンタイムの比率 n_e で表し、 n_e と加工量 ΔD との関係を示す。図6-9ではオンタイムの比率 $n_e=0\%$ 、図6-10では砥石押し付け力 $F_n=54\text{N}$ としている。また、加工時間は120秒間である。正常な加工状態であれば砥石押し付け力 F_n と加工量 ΔD 、オンタイムの比率 n_e と加工量 ΔD とはほぼ直線で近似することができ、砥石押し付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量ともに大きくしてやれば加工量の増加が認められる*。図6-9, 10より加工時間を120秒とした場合、加工量 1mm^3 を得るためには砥石押し付け力 F_n を約143N ($n_e=0\%$ の場合) とするかオンタイムの比率 n_e (電解インプロセスドレッシングの電気量) を約14% ($F_n=54\text{N}$ の場合) にする必要があるこ

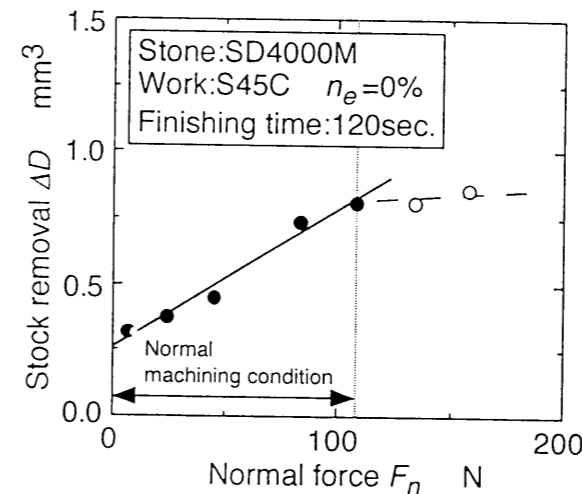


Fig. 6-9 Relation between normal force F_n and stock removal ΔD

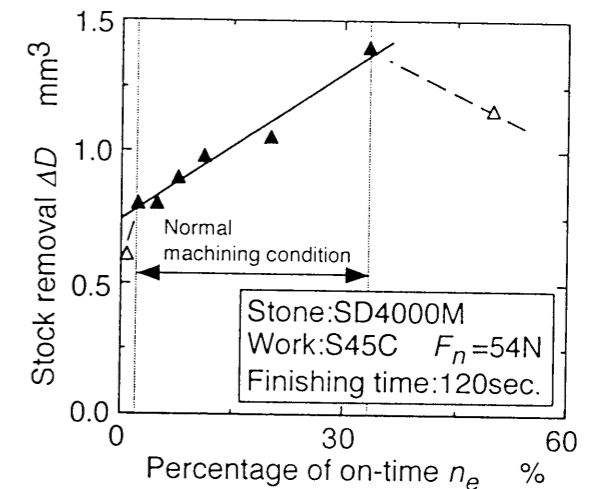


Fig. 6-10 Relation between percentage of on-time n_e and stock removal ΔD

*当然、砥石押し付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量を大きくし過ぎると正常な加工状態は維持できず、加工量の増加は認められない。本研究ではこのような条件は除外している。

とがわかる。加工時間を τ 秒とした時の個々の条件で得られる加工量は次式で求めることができる。

$$\Delta D = \tau / 120 (F_n / 143) \quad (6-1)$$

$$\Delta D = \tau / 120 (n_e / 14) \quad (6-2)$$

砥石押し付け力と電解インプロセスドレッシングの電気量の両方を考慮すると、オンタイムの比率 n_e を増加させることによるドレッシング効果により、砥石押し付け力 F_n を通常より大きく取ることができる等の砥石押し付け力 F_n とオンタイムの比率 n_e との相乗効果により、得られる加工量は式(6-1)、(6-2)で得られる加工量よりも増加してしまう。しかし、本研究では簡便的に砥石押し付け力 F_n 、オンタイムの比率(電解インプロセスドレッシングの電気量) n_e を組み合わせた加工条件を評価するために図6-11のような関係を考え、加工条件 C を定める。 C が大きくなるほど砥石の切削性は増し、多くの加工量を得ることができる。

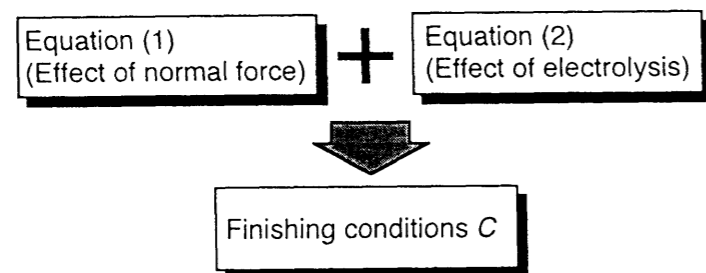


Fig. 6-11 Relation between finishing conditions and some effects

6.3 実験結果

6.3.1 加工時間入力型制御(プロセスA)

加工特性を制御するにあたり、加工条件によって決められた時間内にどれだけの加工量・仕上面粗さが得られるのか予め調べておく必要がある。そこで加工物にS45Cを用い、加工時間を120秒間として加工制御範囲を調べてみた。その結果を図6-12に示す。図より加工物にS45Cを用い、加工時間を120秒間とした場合、砥石押し付け力と電気量を組み合わせた加工条件 C を変化させることによって加工量 $\Delta D=0.45\sim 2.00\text{mm}^3$ 、仕上面粗さ $Ra=0.06\sim 0.11\mu\text{m}$ までの範囲内で加工量・仕上面粗さのコントロールが可能であることがわかる。加工始めに砥石押し付け力と電解インプロセスドレッシングの電気量を組み合わせた加工条件 C が過酷になるように設定し、加工後半で C を緩やかな条件に設定することにより、多くの加工量を得ながらも優れた加工面を得るといった相反する要求に応えることが可能となる。

図6-13に加工物にS45Cを用いて、(I)電解インプロセスドレッシングを行わない場合、(II)加工時間中終始電解インプロセスドレッシングを行った場合、(III)

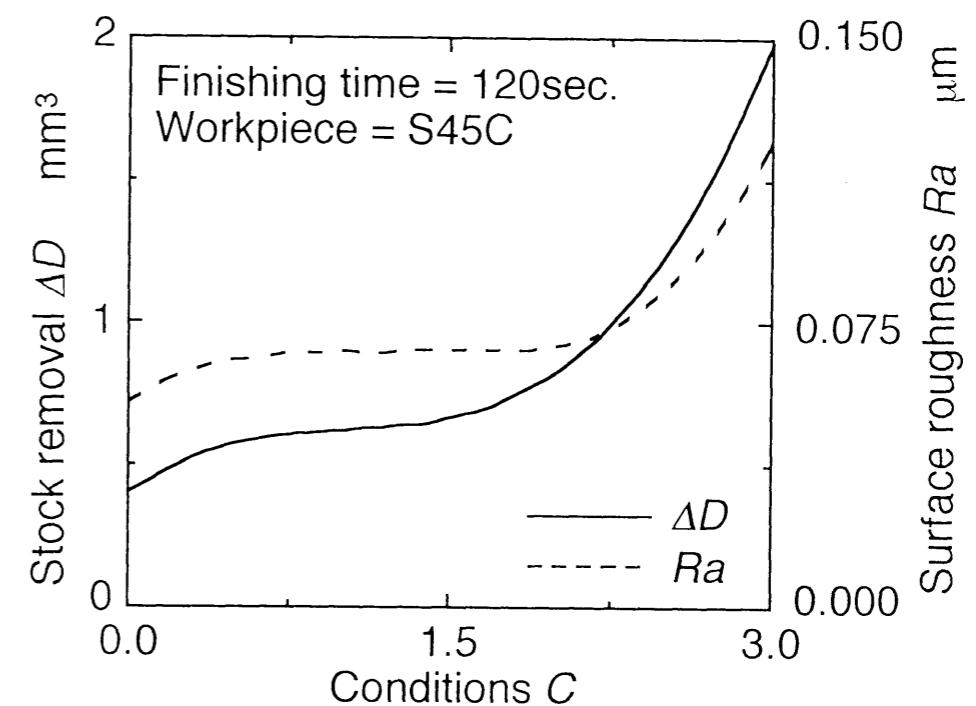
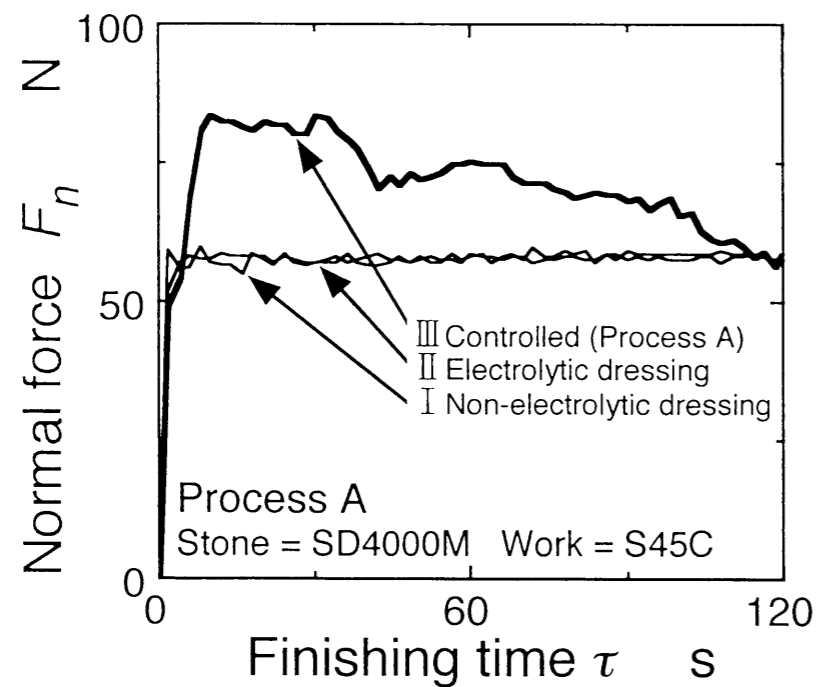
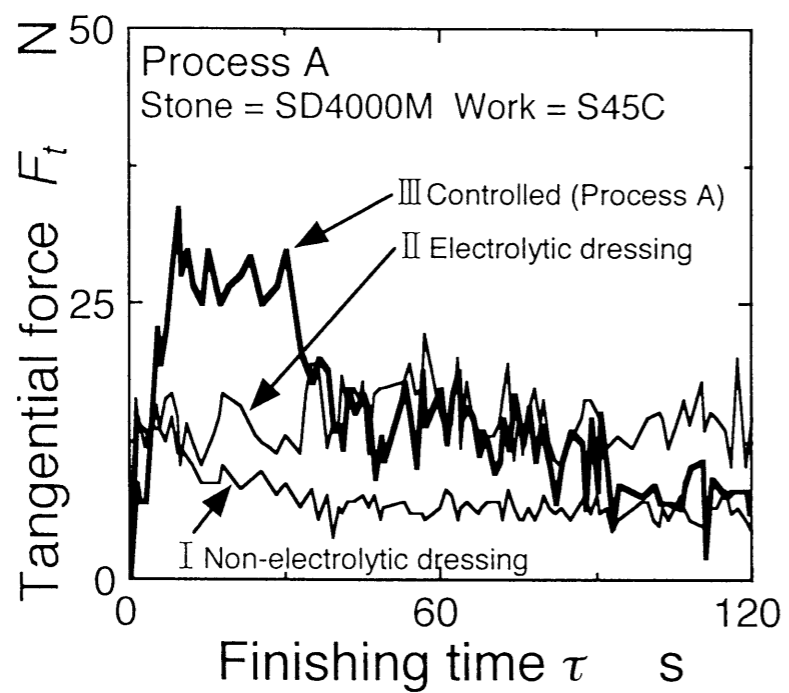


Fig. 6-12 Range of fuzzy control (Process A)



(a) Normal force F_n



(b) Tangential force F_t

Fig. 6-13 Compare finishing resistance

プロセスAにより加工特性を制御した場合の切削抵抗の比較を示す。I、IIの場合
は砥石押し付け力は54N一定としている**。切削抵抗接線方向分力（主分力 F_t ）を
みてみると電解インプロセスドレッシングを全く行わないIの場合、加工時間の経
過とともに砥石は目づまり状態となり、切削抵抗は減少している。一方、加工時間
中終始電解インプロセスドレッシングを行ったIIの場合、切削抵抗は変動しながら
も加工終了まではほぼ一定値を保っている。プロセスAにより制御したIIIの場合、加
工始めに大きな値を示し、次第に電解ドレッシングを全く行わなかった場合に近づ
いていく。加工始めに加工条件Cを過酷にすることにより、加工量重視の加工条件
とし、加工終盤でCを小さくし、仕上面重視の加工条件へと変化していることが分
かる。図6-14にこの時の加工結果を示す。電解インプロセスドレッシングを全く
行わないIの場合、切削工程が短く、砥石はすぐに目づまり状態となり、研磨工程
へと入るため仕上面粗さは良好だが加工量は少ない。一方、終始電解インプロセス
ドレッシングを行ったIIの場合、砥石は切削工程から研磨工程へと変化しないため
加工量は大きくなるものの仕上面粗さは悪い。表6-5にプロセスAの加工結果を示
す。加工量 $\Delta D=1.5\text{mm}^3$ 、 $Ra=0.068\mu\text{m}$ と図6-12の結果を考慮すると、プロセスAに
より加工特性を制御することによって、多くの加工量を得ながらも、仕上面粗さも
良好といった結果を得ており、加工特性の制御効果が現れていることが分かる。制
御を行うことにより、粗加工から仕上加工までを同一砥石で行うことができた。

** 予備実験より砥石押し付け力 $F_p=54\text{N}$ 程度で本実験においては良好な加工状態を得ている。

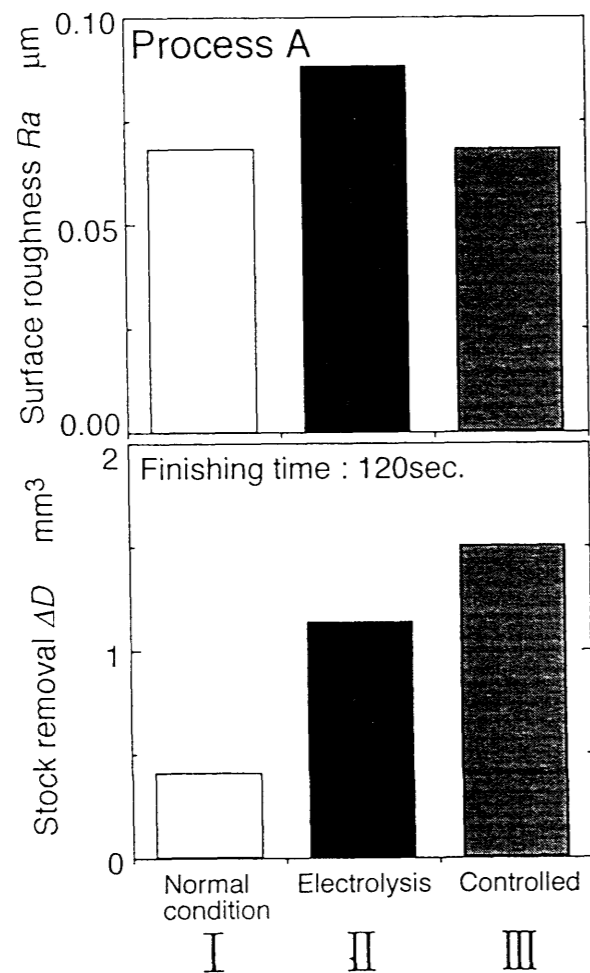


Fig. 6-14 Comparison of finishing performance (Process A)

Table 6-5 Results of superfinishing(Process A)

Process A	
Stone	SD4000M
Workpiece	S45C
Finishing time	120sec.
Stock removal ΔD	1.5mm ³
Surface roughness Ra	0.068 μ m

6. 3. 2 加工目標値入力型制御 (プロセス B)

プロセス B では目標とする加工量および仕上面品位等の加工目標値を入力することによって所要加工時間を切削工程と研磨工程とに分けて算出し、加工目標値を得るように砥石押し付け力、電解インプロセスドレッシングの電気量をコントロールする。表 6-6 に設定した目標加工量および仕上面品位の一例を示す。必要に応じてこの条件は様々に変化することができる。加工回数は 1 回である。表 6-6 の目標値に対する結果を図 6-15 に示す。図 6-15 より A, B, C いずれもプロセス B によりファジィ制御を行うことにより、目標加工量および仕上面品位を得ることができる。同様の加工を連続して行うことができるかを調べるために、加工目標値を表 6-6 の B と同様にして連続 10 回の加工を行った。この時の切削抵抗を図 6-16 に示す。連続した加工を行っても切削抵抗は接線方向 (主分力)、法線方向分力 (砥石押し付け力) 各々加工回数によらずほぼ同様な値を示している。図 6-17 にこの時の加工結果を示す。連続した加工を行ってもほぼ目標加工量に近い加工量を得ることができている。また、仕上面粗さも連続加工回数によらず、ほぼ目標通りの仕上面粗さを得ることに成功している。

プロセス B により加工特性を制御することによって加工時間中、加工を中断して機械的ドレッシング (スティック砥石によるドレス) を行うことなく砥石の切削性能を切削状態→研磨状態→切削状態→研磨状態・・・と連続的に安定した加工サイクルを実現させることに成功した。これらの結果より、金型のような加工表面の大きな部材に対する加工もプロセス B で制御することにより可能であると思われる。

Table 6-6 Finishing aim(Process B)

	Stock removal	Surface roughness
A	1 mm ³	0.076 μ m and over
B	1 mm ³	0.060-0.064 μ m
C	2 mm ³	0.060-0.064 μ m

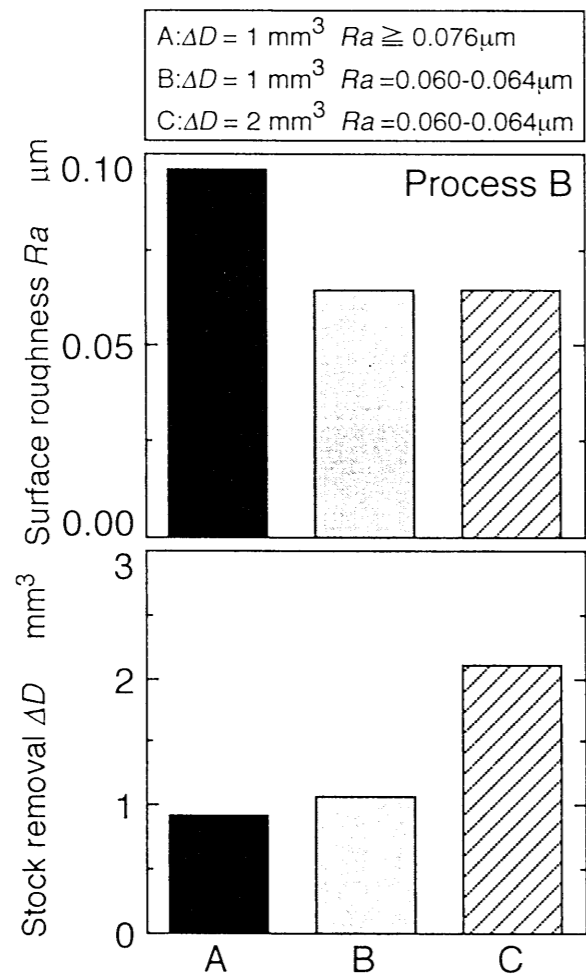


Fig. 6-15 Results of finishing performance (Process B)

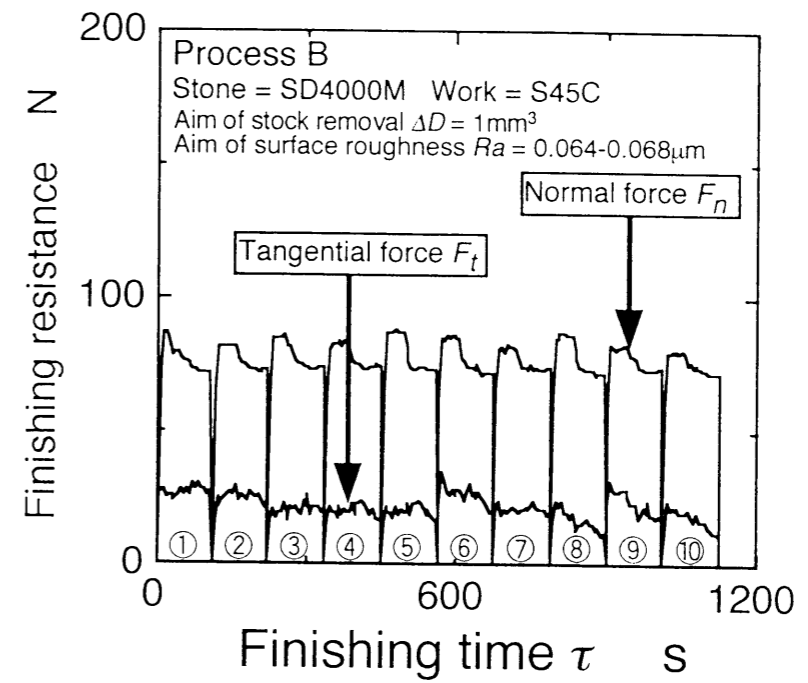


Fig. 6-16 Finishing resistance of Process B

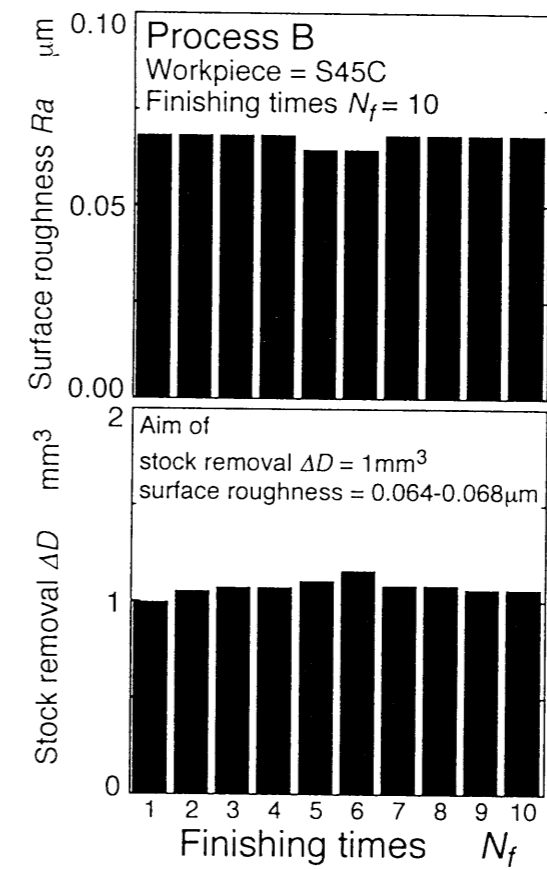


Fig. 6-17 Finishing performance of Process B

6. 4 結 言

メタルボンド砥石はその強い砥粒保持力のため、普通砥石のように加工特性をコントロールすることは難しい。そこで本章では加工抵抗を加工状態の監視信号として、ファジィ制御の手法を用い、メタルボンド砥石を用いた超仕上加工に対して加工特性の制御を試みた。粗加工から仕上加工までを一つの砥石で受け持たせるため、普通砥石を用いた場合の切削性能の推移と同様な切削性能の推移をメタルボンド砥石に持たせることを試みた。また、目標加工量および目標仕上面品位を定め、目標を到達するように加工特性をコントロールすることも試みた。さらに、連続加工への対応も試みた。連続加工が可能となれば、金型等の加工表面の広い部材へも容易に対応可能となる。

得られた主な結果は次のようである。

- (1) ファジィ制御を行うことにより、砥石の切削性能を切削状態から研磨状態へと意図的に変化させることが可能であり、粗加工から仕上加工までを同一砥石で加工可能である。
- (2) 加工時間入力型の制御では、より多くの加工量を得ながらも、より良好な仕上面を得るといった相反する要求に応えることができる。
- (3) 加工目標値入力型の制御では要求した加工量・仕上面品位に合うよう、電解ドレッシングの電気量、砥石押し付け力、加工時間をコントロールすることができる。
- (4) 同一加工量・仕上面品位の加工を連続して行った場合でも、機械的ドレッシング無しに連続的な加工サイクルを実現させることが可能である。

参考文献

- 6-1) 例えば、佐久田 茂，足立幹雄，小川 潔，上田勝宣：超精密位置制御に関する研究（第1報）－粗・微動の連動制御－，精密工学会誌，57，12（1991）2133.
- 6-2) 例えば、中島利勝，塚本真也，村上大介，倉田勝弘：ファジィ・インプロセス制御研削加工

－研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究（第1報）－，精密工学会誌，58，2（1992）313.

- 6-3) 例えば、中島利勝，塚本真也，村上大介，安田浩隆：ニューロ&ファジィ・インプロセス制御研削加工－研削加工プロセスの知能的自動化に関する研究（第3報）－，精密工学会誌，59，8（1993）1313.
- 6-4) 例えば、日本ファジィ学会編：ファジィ制御，日刊工業新聞，（1993）4.
- 6-5) 例えば、河村末久，矢野章成，樋口誠宏，杉田忠彰：研削加工と砥粒加工，共立出版，（1984）182.
- 6-6) 松森 昇：超砥粒による精密砥粒加工技術，機械の研究，42，4（1990）482.
- 6-7) 上田隆司，坂本 智，杉田忠彰：水溶性加工液による超仕上，精密工学会誌，62，2（1996）252.
- 6-8) 上田隆司，坂本 智，杉田忠彰：超仕上における砥石の切れ味制御，精密工学会誌，62，10（1996）1401.
- 6-9) 上田隆司，金曾久佳，杉田忠彰：超仕上の加工機構に関する研究，日本機械学会論文集C編，57，538（1991）2154.
- 6-10) 上田隆司，花見真司，平野 聡，山本 明：ファインセラミックスのホーニング加工－ダイヤモンド砥石の結合剤が切削性能に及ぼす影響，精密機械，51，6（1982）1195.

第7章 総括

近年、身近な小型電子機器から、半導体パターン形成、レーザー機器開発、さらにはX線光学素子のグレーティング等に対する超精密表面加工技術が要求されてきている。加工物の微小化・高精度化に伴い、仕上面粗さだけでなく、加工表面に損傷を与えない精密加工が望まれるようになってきている。現在、遊離砥粒を用いたラッピングやポリッシングがこのような要求に応えているが、加工速度が非常に遅いという欠点を持っている。

超仕上加工は極めて短時間で、加工変質層が少ない平滑な仕上面を得るような高精度な加工が実現できる優れた精密加工法の一つである。このような超仕上加工に電解インプロセスドレッシングおよびファジィ制御の手法を適用することによって加工効率の向上、加工特性のコントロールを試みた。

まず第1章（序論）では、超仕上加工の現状と問題点について述べ、本論文に関連する研究（超仕上加工、電解インプロセスドレッシング、ファジィ制御）について述べた。また、本研究の目的を明らかにし、研究方法について述べた。

第2章（電解インプロセスドレッシング、ファジィ制御および加工特性の評価方法についての理論的検討）では、電解インプロセスドレッシングの基本原理について述べた。電解インプロセスドレッシングの電気量の目安としてオンタイムの比率 n_t の定義を行った。また、加工中、電解による砥石-電極間隙の変化が著しいと安定したドレッシング効果が得難い。そこで、ファラデーの法則をもとに導出された電解加工の理論式を応用して電解速度および砥石-電極間隙の変化を理論的に導出を行った。その結果、加工時間中の砥石-電極間隙の変化は微小であり、安定したドレッシング効果が期待できることを明らかにした。

ファジィ制御は制御対象を数式表現化する必要が無い場合、工具として働く砥粒の複雑な挙動を数式化することが難しい砥粒を用いた加工を制御するのに適した手法であるといえる。特に超仕上加工のように砥粒切れ刃の状態が切削状態から研磨状態へと変化する加工法の加工状態を制御する方法として有効である。

超仕上加工では砥粒切れ刃の状態が一定しないため、加工状態を評価するには巨

視的に砥石を1個の工具とみなし、加工過程をモデル化して扱う解析手法が有効となる。この解析手法を超仕上加工に適用することにより、加工状態を把握するための評価関数、砥石平均切込み深さ \bar{d} および比加工エネルギー k_s を導出した。 \bar{d} 、 k_s は加工抵抗、加工速度、加工条件で求めることができる。 \bar{d} が大きいとき、砥石の切削性能が良いことを表す。この時、 k_s が小さければなお良い。逆に \bar{d} が小さく、 k_s が大きいとき、砥石の切削性能は悪いと判断できる。さらに \bar{d} 、 k_s を用いることにより、加工条件の過酷さを他の加工法と同一レベルでの評価も可能である。

本研究ではリング状砥石を用いた円筒超仕上を行うため、従来の角柱状砥石を用いた円筒超仕上加工とは砥石-加工物間の接触状態が異なってくる。リング状砥石を用いることにより砥石-加工物間が面接触から線接触に近い状態となり、加工形態が大きく異なる恐れがある。そこで砥石-加工物間の接触弧の長さを理論的に算出し、実測値との比較を行い考察を加えた。さらに、仕上面のSEM観察を行った。その結果、リング状砥石を用いた場合も接触面積は理論値の約34倍となり、十分面接触と考えることができる。このことは装置の剛性、砥石・加工物の弾性変形等の影響によるものである。仕上面の加工条痕も角柱状砥石を用いた場合と同様で、基本的に角柱状砥石を用いた場合と同様な加工形態と考えることができる。また、リング状砥石を用いることにより砥石-加工物間への加工液の供給が容易になり、切りくず排出能力が向上する。

第3章（超仕上加工における加工表面損傷の曲げ強さへの影響）では砥粒径の小さな砥石を用いる超仕上加工も切りくずを生成する加工である以上、加工表面に何らかの損傷を与えるものと考え、超仕上加工が仕上面に与える損傷の程度について、その曲げ強さを測定することにより調べた。加工物には硬脆材料であるアルミナやフェライトなどのセラミック材料を、砥石には#500～#8000までの粒度の砥石を用い、平面超仕上を施した。さらに、破壊力学的立場からも考察を加えた。その結果、#500～#4000までの砥石では切りくずを生成する正常な加工であることを確認した。#2000程度の砥石（砥粒径約 $2.7\mu\text{m}$ ）で超仕上加工を行うことにより、短時間で効率的に仕上面粗さを $0.2\sim 0.5\mu\text{mRy}$ 程度に改善することができ、焼結面と同程度の材料強度に回復できることが分かった。また、超仕上加工を施した材料

でもその強度は加工方向に依存し、加工痕を開口する方向の曲げモーメントに対して小さくなることから、加工表面に現れないメディアンき裂の影響を考える必要があることを示唆した。さらに加工表面に与えるダメージを抑えるためには、砥粒径の小さな砥石を用いること、砥石圧力を下げることが有効であり、砥粒径を小さくする方がより効果的であることが分かった。しかし、砥粒径の小さな砥石を用いると、砥石が目づまりを生じやすくなり、砥石の切れ味は格段に低下してしまうことになる。この解決法として、電解インプロセスドレッシングの援用が考えられる。

第4章（水溶性加工液による超仕上）では、電解インプロセスドレッシングの援用および加工ラインの簡素化を目的とし、油性加工液の代わりに水溶性加工液を用いて常圧焼結のアルミナ、軟鋼（S15C相当）の超仕上加工を行い、水溶性加工液の有用性について検討した。その結果、次のような結論を得た。水溶性加工液は一般に浸透性・潤滑性に劣るが、アミン系加工物を主成分とし、界面活性剤を大量に含有する加工液を用いることによって、安定したドレッシング効果を得ることができる。最適電解条件は加工物により異なり、目づまりを生じやすい材料では強い電解条件が必要となる。また、電解インプロセスドレッシングは砥粒保持力の強固な砥石を用いた場合に特に有効であり、砥粒径の小さな砥石を用いた場合においても効果は大きい。さらに油性加工液を用いた超仕上加工との加工特性の比較を行った結果、水溶性加工液を用いても加工は十分可能であることを明らかにした。

超仕上加工に水溶性加工液を用いることが十分有効であることを明らかにしたが、このことは次のような利点もある。研削加工など他の加工法では水溶性加工液を用いる場合が多いため、油性加工液を用いる超仕上加工を仕上加工として加工ラインに組む場合、水溶性加工液の洗浄・乾燥後に超仕上加工を行う必要が生じる。超仕上加工に水溶性加工液を用いれば洗浄などの工程を省くことができ効率的に加工ラインの簡素化が可能となる。また、加工液を1種類に統一することも可能となり、その管理を極めて単純化できる。

第5章（超仕上における砥石の切れ味制御）では第4章で行った電解インプロセスドレッシングを応用して、砥石の切れ味を制御しながら加工を行う方法について実験的に検討を行った。本章では電解インプロセスドレッシングを適用するために、

新たな試みとして角柱状砥石の代わりにリング状砥石を用いる円筒超仕上装置を製作し、実験に用いた。加工物には炭素鋼S45Cを用いた。その結果をまとめると次のようになる。電氣量をコントロールすることにより、種々の加工状態を意図的に作り出すことができる。このことにより、粗加工から仕上加工までを同一砥石で行うことが可能となる。また、目づまり等のため切れ味を失った砥石でも電解インプロセスドレッシングを行うことにより、加工を中断することなく加工当初の切れ味に回復することができる。さらに、超仕上の加工物として最も利用頻度が高い軸受鋼SUJ2と硬脆材料である常圧焼結のアルミナに対しても実験を行い、被削性の異なる種々の加工物を同一砥石で加工できる可能性も十分あることを明らかにした。

第6章（超仕上加工における切削性能のファジィ制御）では第5章の応用として、超仕上加工にファジィ制御の適用を試みた。加工抵抗を加工状態の監視信号として、加工特性をコントロールすることが難しいダイヤモンド砥石を用いた加工に適用した。具体的には、粗加工から仕上加工までを一つの砥石で行うことを目的とし、普通砥石と同様な切削性能の推移をメタルボンド砥石に持たせることを試みた（加工時間入力型制御）。その結果、決められた時間の中でより多くの加工量を得ながら、より良好な仕上面を得るといった相反する要求に応えることが可能となった。また、目標加工量および目標仕上面品位を定め、目標を達成するように加工特性をコントロールすることも試みた（加工目標値入力型制御）。その結果、要求した加工量・仕上面品位に短時間で到達するよう、コントロールすることができた。このようにファジィ制御により砥石押し付け力・電解インプロセスドレッシングの電氣量、加工時間をコントロールすることにより、加工目的に合った加工特性を実現させることができた。さらに、連続加工への対応も試みた。その結果、同一加工量・仕上面品位の加工を連続して行った場合でも、機械的ドレッシング無しに連続的な加工サイクルを実現させることが可能であることがわかった。このことより、金型のような加工表面の大きな部材への対応も可能となった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始御懇切な御指導と御鞭撻を賜りました恩師金沢大学上田隆司教授に深甚なる謝意を表すとともに、懇切なる御指導と御教示を頂きました金沢大学杉田忠彰教授に厚く御礼申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり有益なる御教示と御校閲を賜りました金沢大学黒部利次教授、北川正義教授、米山 猛助教授に心から謝意を表すとともに、御激励を頂きました横浜国立大学八高隆雄教授に深く感謝いたします。日常の細部にいたるまで面倒をみていただいた金沢大学西 誠講師、金沢大学山田啓司助手に感謝します。

また、本研究の遂行に当たり、多大の御支援、加工液に関する貴重なデータの提供を賜りました日本グリース株式会社技術研究所山本隆一主幹研究員に深く感謝するとともに、砥石製作に関する貴重な御助言および精密加工用砥石を製作して頂いた株式会社ミズホ取締役技術担当松森 昇氏、株式会社ミズホ技術部明石和彦氏に深謝いたします。実験材料を提供して頂いたアルプス電気株式会社主幹技師稲田明弘氏、日本特殊陶業課長早川正勝氏に厚く感謝いたします。

本研究の経過において、電解インプロセスドレッシングに関する貴重な資料および御助言を頂いた理化学研究所素形材工学研究室大森 整氏に改めて厚く御礼申し上げます。また、様々な方面でご協力頂きました金沢大学工学部機械システム工学科生産加工学研究室、金沢大学工学部機械システム工学科機械製造システム研究室の方々に厚く感謝申し上げます。

最後に卒業研究として著者ととともに熱心に実験に取り組んだ金沢大学機械システム工学科機械製造システム研究室の卒業研究生諸氏の努力に心から感謝の意を表します。

直接携わったのは、

平成5年度卒業研究生 石山淳一（現：J R 東海）

平成6年度卒業研究生 杉浦智康（現：富士機械製造（株））

平成7年度卒業研究生 宮田真秀（現：（株）NTN）

平成8年度卒業研究生 久保 智（現：金沢大学学生）

の諸氏である。ここに記して改めて謝意を表します。

付録A 各種条件下における \bar{d} , k_s の導出

A-1 平面超仕上における \bar{d} の導出

第2章で加工物の幅と砥石幅との大小、振幅の大小によって次に示すような5つの場合分けを行った。

- (1) $L_w < (d_o - d_i) / 2$ $a > \{ (d_o - d_i) / 2 - L_w \} / 2$
- (2) $L_w < (d_o - d_i) / 2$ $a < \{ (d_o - d_i) / 2 - L_w \} / 2$
- (3) $L_w = (d_o - d_i) / 2$
- (4) $L_w > (d_o - d_i) / 2$ $a > \{ L_w - (d_o - d_i) / 2 \} / 2$
- (5) $L_w > (d_o - d_i) / 2$ $a < \{ L_w - (d_o - d_i) / 2 \} / 2$

第2章で行った(3)の場合の導出同様、他の場合も砥石平均切込み深さ \bar{d} は容易に導出可能である。要するに砥石または加工物の振動1周期分の加工面積を求めれば、加工時間および加工量を測定することにより砥石平均切り込み深さ \bar{d} は求めることが可能である。今、加工物オーバーランの領域を図A-1の様に定める。

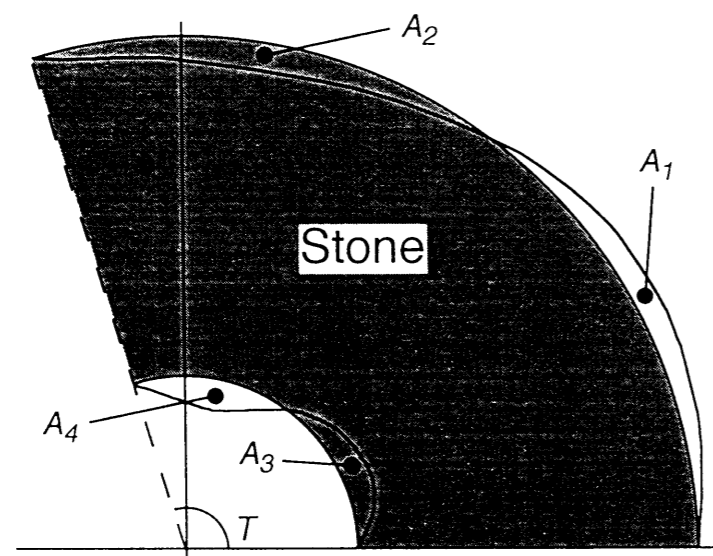


Fig. A-1 Definition of over-run area

砥石1回転での加工物振動数 W は、 N を加工物の振動数、 λ を砥石回転数とすると、

$$W = \frac{N}{\lambda} \quad (\text{A-1})$$

加工物の振動1周期分に移動する砥石の回転角度 T は、

$$T = \frac{2\pi\lambda}{N} = \frac{2\pi}{W} \quad (\text{A-2})$$

加工物の振動 $\delta R(\theta)$ を接線極座標で表すと、

$$\delta R(\theta) = b_n \sin W\theta \quad (\text{A-3})$$

$$b_n = a \quad (\text{A-4})$$

$$\delta R(\theta) = a \sin W\theta \quad (\text{A-5})$$

ここで $\delta R(\theta)$ は奇関数である。 a : 加工物の振幅

加工物振動の外端の基準円を C_o 、内端の基準円 C_i とする。

$$C_o = \frac{1}{2}(r_o - r_i + L_w) + r_i \quad (\text{A-6})$$

$$C_i = \frac{1}{2}(r_o - r_i - L_w) + r_i \quad (\text{A-7})$$

ここで r_o : 砥石内径, r_i : 砥石内径

加工物外端，内端の軌跡は外端を $\delta R_o(\theta)$ ， $\delta R_i(\theta)$ とすると，

$$\delta R_o(\theta) = a \sin W\theta + C_o \quad (\text{A-8})$$

$$\delta R_i(\theta) = a \sin W\theta + C_i \quad (\text{A-9})$$

と表すことができる。

A-1-1

加工物長さ L_w より砥石幅 ($b = r_o - r_i$) が小さく，加工物の振幅 a が砥石幅よりもでない場合。

$$L_w < r_o - r_i \quad a < \frac{1}{2}(r_o - r_i - L_w)$$

$$A_s = \frac{1}{2} \int_0^\pi \{ \delta R_o(\theta)^2 - \delta R_i(\theta)^2 \} d\theta$$

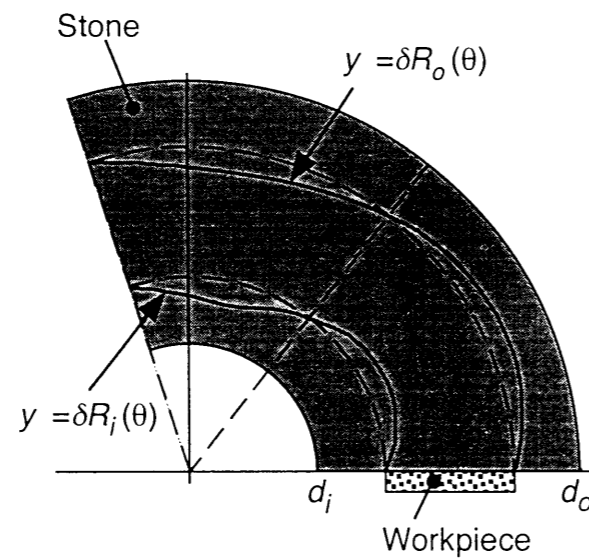


Fig. A-2 Schematic illustration of expansion of stone surface

A-1-2

加工物長さ L_w より砥石幅 ($b = r_o - r_i$) が小さく，加工物の振幅 a が砥石幅よりもである場合。

$$L_w > r_o - r_i \quad a > \frac{1}{2}(r_o - r_i - L_w)$$

$$A_s = \frac{1}{2} \int_0^\pi \{ \delta R_o(\theta)^2 - \delta R_i(\theta)^2 \} d\theta - A_1 - A_2$$

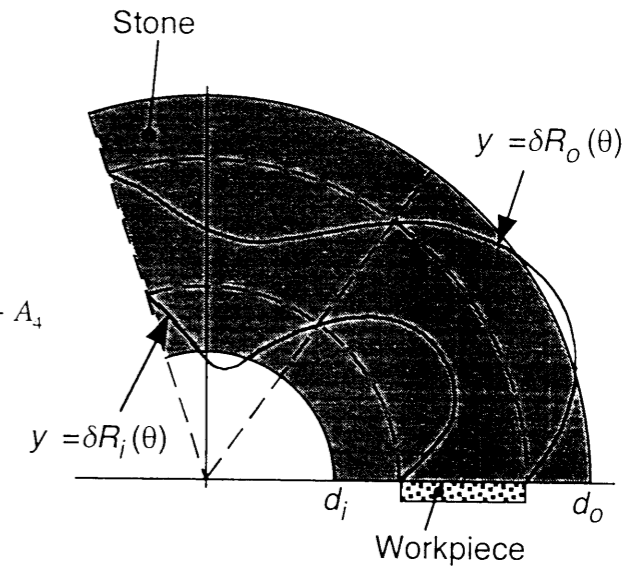


Fig. A-3 Schematic illustration of expansion of stone surface

A-1-3

加工物長さ L_w より砥石幅 ($b = r_o - r_i$) が大きく，加工物の振幅 a が小さい場合。

$$L_w < r_o - r_i \quad a < \frac{1}{2}(r_o - r_i - L_w)$$

$$A_s = \frac{1}{2} \int_0^\pi \{ r_o^2 - r_i^2 \} d\theta$$

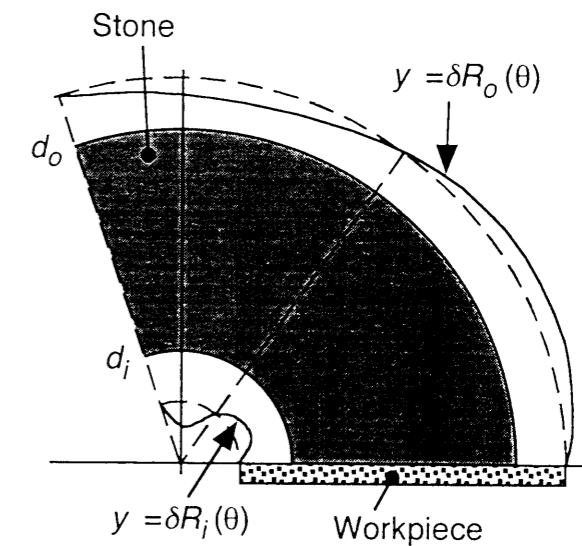


Fig. A-3 Schematic illustration of expansion of stone surface

A-1-4

加工物長さ L_w より砥石幅 ($b = r_o - r_i$) が大きく、加工物の振幅 a が大きい場合.

$$L_w < r_o - r_i \quad a > \frac{1}{2}(r_o - r_i - L_w)$$

$$A_s = \frac{1}{2} \int_0^\pi \{r_o^2 - r_i^2\} d\theta - A_2 - A_3$$

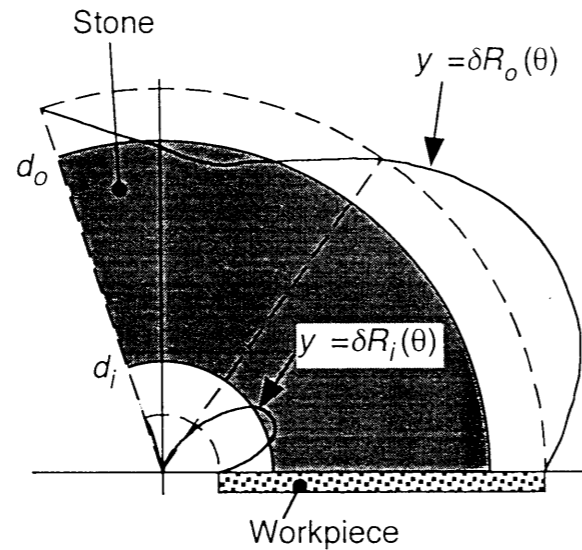


Fig. A-5 Schematic illustration of expansion of stone surface

加工物の振動 1 周期分の加工面積 A_s を求めると、加工時間中の全加工面積 ΣA_s は容易に求めることができる。

A-2 円筒超仕上における \bar{a} の導出

第2章で加工物の幅と砥石幅との大小、振幅の大小によって次に示すような5つの場合分けを行った。

- (1) $b < B \quad a > (B - b) / 2$
- (2) $b < B \quad a < (B - b) / 2$
- (3) $b = B \quad (B - b) / 2 = 0$
- (4) $b > B \quad a > (B - b) / 2$
- (5) $b > B \quad a < (B - b) / 2$

第2章で行った(1)の場合の導出同様、(2)～(5)の場合も砥石平均切込み

深さ \bar{a} は容易に導出可能である。

加工物両端の振動を y_1, y_2 とする。砥石オーバーランの領域を図A-6の様に定める。

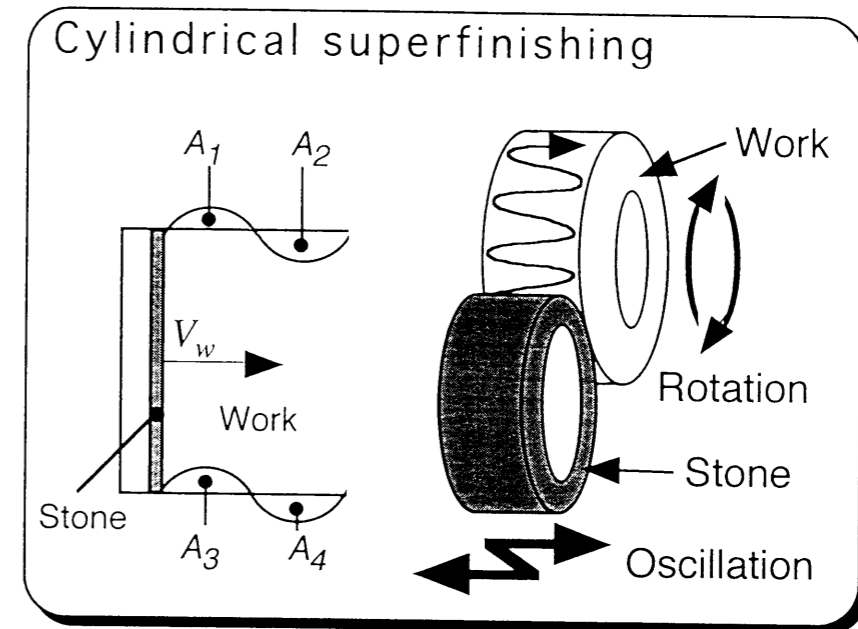


Fig. A-6 Schematic illustration of cylindrical superfinishing

$$y_1 = a \sin \frac{2\pi}{V_w T} x \quad (A-10)$$

$$y_2 = a \sin \frac{2\pi}{V_w T} x - (b + \varepsilon) \quad (A-11)$$

A-2-1

加工物の幅 B が砥石幅 b よりも大きく、砥石の振幅が ε より小さい場合.

$$b > B \quad a > (B-b)/2$$

$$A_s = \int_0^{\tau} (y_1^2 - y_2^2) dx$$

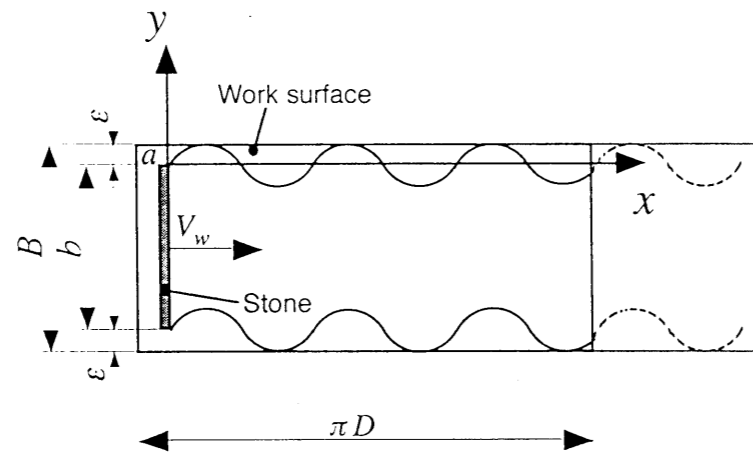


Fig. A-7 Schematic illustration of expansion of stone surface

A-2-2

加工物の幅 B と砥石の幅 b が同じ場合.

$$b = B \quad (B-b)/2 = 0$$

$$A_s = 2 \int_0^{\tau} (y_1^2 - y_2^2) dx - A_1 - A_3$$

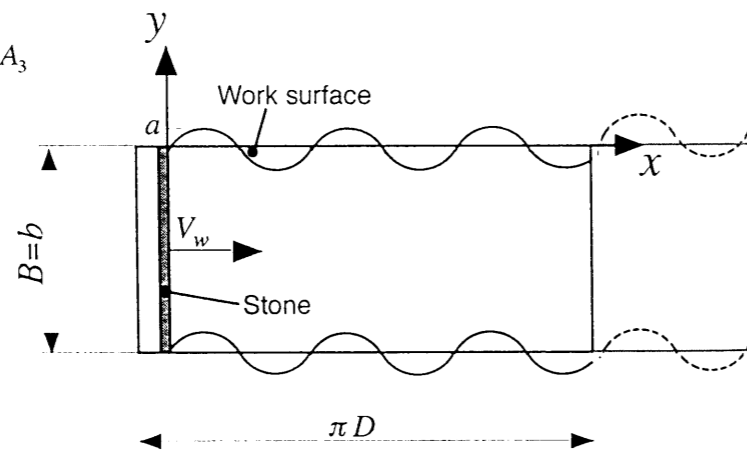


Fig. A-8 Schematic illustration of expansion of stone surface

A-2-3

加工物の幅 B が砥石の幅 b よりも大きく、砥石の振幅が ε より大きい場合.

$$b < B \quad a > (B-b)/2$$

$$A_s = B \times V_w \times \tau - A_2 - A_3$$

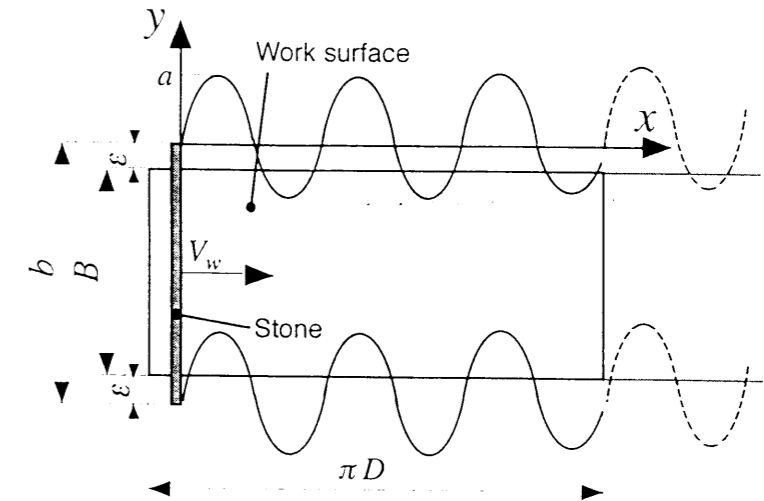


Fig. A-9 Schematic illustration of expansion of stone surface

A-2-4

加工物の幅 B が砥石の幅 b よりも小さく、砥石の振幅が ε より小さい場合.

$$b > B \quad a < (B-b)/2$$

$$A_s = B \times V_w \times \tau$$

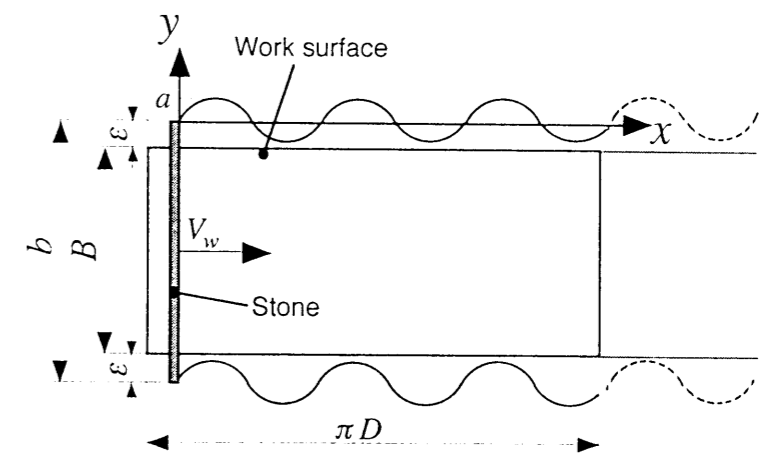


Fig. A-10 Schematic illustration of expansion of stone surface

加工物の振動 1 周期分の加工面積 A_s を求めることにより, 加工時間中の全加工面積 ΣA_s は容易に求めることができる.

付録 B ファラデーの法則を応用した 電解速度の導出

本論文中で用いた電解速度の導出を Faraday の法則を応用した電解加工の理論式より導出する. まず, 図 B-1 に示すように x 軸, y 軸を定める.

Faraday の法則より元素 1g が溶出するのに要する電気量は次のように表される.

$$\frac{n_i F}{M_i} \quad (\text{B-1})$$

ここで

n_i : ボンド剤の原子価, M_i : 原子量, n_i : ファラデー定数 ($9.6485309 \times 10^4 \text{C/mol}$)
電流 I が時間 $\Delta \tau_d$ 流れた時に溶出するボンド量 w_i は,

$$w_i = \frac{M_i I \Delta \tau_d}{n_i F} \quad (\text{B-2})$$

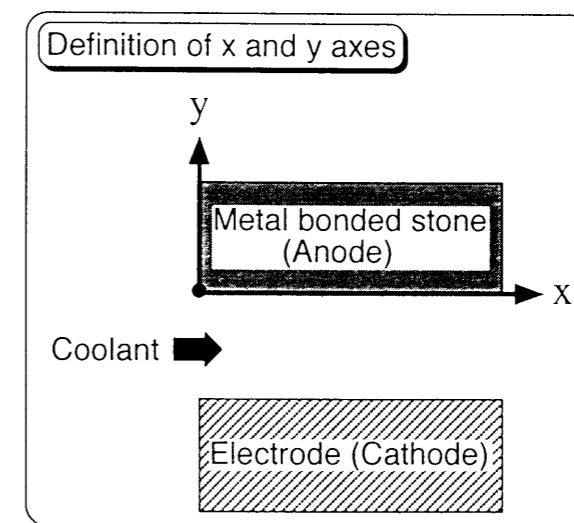


Fig. B-1 Definition of axes

元素の密度を γ_i とすると除去体積 V_o は,

$$V_o = \frac{M_i I \Delta \tau_d}{n_i F \gamma_i} \quad (\text{B-3})$$

実際の除去体積は電流効率 η を乗じた値となるので,

$$V_b = \eta \frac{M_i I \Delta \tau_d}{n_i F \gamma_i} \quad (\text{B-4})$$

電解作用は深さ方向のみに生じるため、砥石作業面積を S とすると溶出深さ（砥石面後退量） Δl は,

$$\Delta l = \eta \frac{M_i I \Delta \tau_d S_r}{n_i F \gamma_i S} \quad (\text{B-5})$$

ここで S_r : 電極と砥石の面積比
電解ドレッシング速度 v_l は,

$$v_l = \frac{\Delta l}{\Delta \tau_d} = \eta \frac{M_i I S_r}{n_i F \gamma_i S} \quad (\text{B-6})$$

砥石が単一元素で構成されており、なおかつ加工時間中、電解作用に関わる諸条件に変化がなければ式 (B-6) の適用が可能である。しかし、このような仮定は不可能である。

加工液の抵抗 R_c を介して電流 I が流れるための電圧降下 E は,

$$E = E_0 - \Delta E = IR_c \quad (\text{B-7})$$

$$R_c = \frac{y}{\kappa S} \quad (\text{B-8})$$

$$v_l = \frac{S}{y} \quad (\text{B-9})$$

$$I = \frac{E_0 - \Delta E}{R_c} = \frac{E \kappa S}{y} \quad (\text{B-10})$$

ここで E_0 : 印加電圧, ΔE : 陰陽両極の分解電圧（電極の可逆電位および各種加電圧の和）, R_c : 加工液の抵抗
加工液の導電率を κ とすると,

$$v_l = \eta \frac{M_i \kappa E S_r}{n_i F \gamma_i} \cdot \frac{1}{y} \quad (\text{B-11})$$

ここで、砥石は単一の元素のみからなるものではなく、各種元素が各々の含有率を持つ合金である。それぞれの元素の含有率を c_i とすると電解ドレッシング速度は,

$$v_l = \frac{\eta \kappa E S_r}{F \sum_i \frac{n_i \gamma_i c_i}{M_i}} \cdot \frac{1}{y} \quad (\text{B-12})$$

と表すことができる。

通電に伴う加工液の液温上昇、ガスの発生を図B-2, 図B-3にのように仮定し、それらを考慮すると加工液の導電率 κ は,

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \Delta T_c \alpha) \quad (\text{B-13})$$

$$\kappa = \kappa_0 (1 - \beta)^{-3/2} \quad (\text{B-14})$$

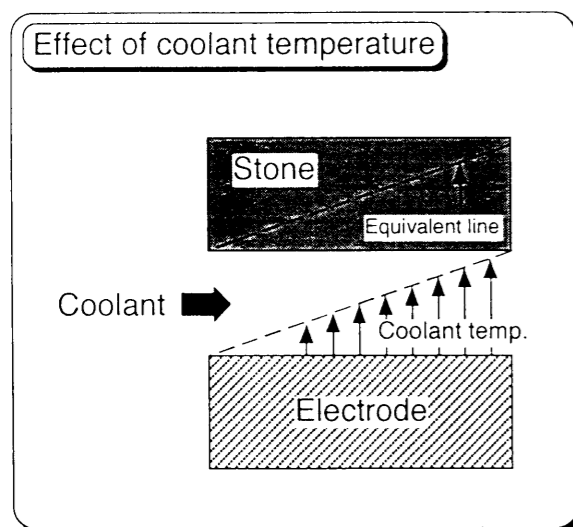


Fig. B-2 Effect of temperature

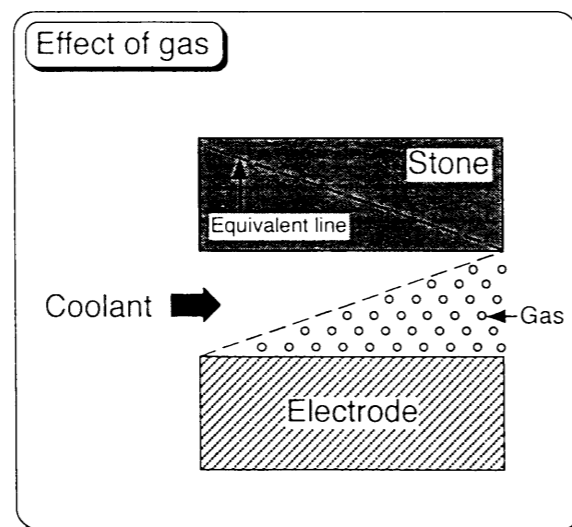


Fig. B-3 Effect of gas

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \Delta T_c \alpha) (1 - \beta)^{-3/2} \quad (B-15)$$

ここで κ_0 : 導電率の初期値, ΔT_c : 加工液温の変化量, α : 加工液の温度係数, β : 気泡率 (ガスの混入割合) である. 式(B-15)を式(B-12)に代入すると,

$$v_l = \eta \frac{\kappa_0 (1 + \Delta T_c \alpha) (1 - \beta)^{3/2} E S_r}{F \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \frac{1}{y} \quad (B-16)$$

溶出する砥石にはボンド剤のみでは無く, 砥粒が含まれている. 砥粒は砥石中に均一に分布していると仮定し, 砥粒集中度 C_g と砥石単位体あたりの砥粒重量 G_d との関係は,

$$C_d = 8787.312 \times 10^{-9} C_g \quad [g / mm^3] \quad (B-17)$$

溶出する砥石中の砥粒体積を V_g , 砥粒の密度を γ_g とすると,

$$V_g = \frac{V_b G_d}{\gamma_g} \quad (B-18)$$

砥粒を考慮に入れた砥石溶出体積は V_a ,

$$V_a = V_b + V_g = V_b + \frac{V_b G_d}{\gamma_g} = V_b (1 + G_d \gamma_g^{-1}) \quad (B-19)$$

実験で電解ドレッシングには直流電源ではなく, 図B-4に示すようなパルスが発生する直流パルス電源を用いているため, オンタイムとオフタイムの比率を考慮する必要がある. オンタイムの比率 n_e を考慮すると式 (B-16) は,

$$V_a = V_b n_e (1 + G_d \gamma_g^{-1}) \quad (B-20)$$

$$v_l = \eta \frac{\kappa_0 (1 + \Delta T_c \alpha) (1 - \beta)^{3/2} n_e E S_r (1 + G_d \gamma_g^{-1})}{F y \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \quad (B-21)$$

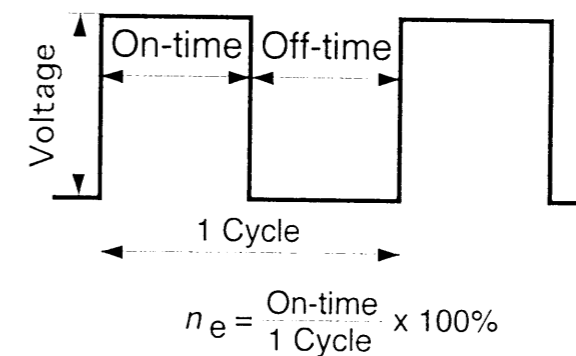


Fig. B-4 Schematic illustration of pulse

$$v_i = \eta \frac{\kappa_0(1+\Delta T_c \alpha)(1-\beta)^{3/2} ES_r(1+G_d \gamma_s^{-1})}{Fy \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \quad (\text{B-22})$$

と表すことができる。

実験では電極面積は小さく、加工液を豊富に供給していることから、加工中の加工液の状態変化は無視することができる。また、実験では不導体被膜などの電解生成物を極力生成しない条件で加工を行っているため、ギャップ y 以外の項は一定であると考える。

$$v_i = \frac{s}{y} \quad (\text{B-23})$$

ここで s は、

$$s = \eta \frac{\kappa_0(1+\Delta T_c \alpha)(1-\beta)^{3/2} n_e ES_r(1+G_d \gamma_s^{-1})}{F \sum_i \frac{n_i}{M_i} \gamma_i c_i} \quad (\text{B-24})$$

従って、 $v_i = dy/d\tau_d$ よりギャップ y が求まる。ここで、加工中 s は変化しないとし、 $\tau_d = 0$ で $y = y_0$ とすると、

$$y = \sqrt{2s\tau_d + y_0^2} \quad (\text{B-25})$$

$$v_i = \frac{s}{\sqrt{2s\tau_d + y_0^2}} \quad (\text{B-26})$$

が得られる。

